



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Kóczyán István, Mohos András

# **A 2 – 150 kHz frekvenciatartomány vizsgálata elektromágneses összeférhetőség szempontjából**

TDK dolgozat

KONZULENS

**Dr. Ladányi József, Dr. Varjú György**

BUDAPEST, 2016

## Összefoglaló

---

A 2 - 150 kHz frekvenciatartomány az elektromágneses összeférhetőség szempontjából jelenleg egy szabályozatlan sávot képvisel, amelyre a zavartűrési- és zavarkibocsátási szintek, határértékek még nem, vagy csak úgynevezett termékszabványok által definiáltak. A DC - 2 kHz sávra, és a 150 kHz-től kezdődő rádiófrekvenciás tartományra vonatkozóan számos szabvány létezik, azonban a kettő közötti sávban az elektromágneses összeférhetőség biztosítása, a jelen és a közeljövő nagy kihívása. A teljesítményelektronika fejlődésével egyre több olyan berendezés (pl. hálózati inverter) kerül a hálózatra, amelyeknek zavarkibocsátása (pl. kapcsolási frekvenciájának felharmonikusai) a kérdéses frekvenciasávba esik. Az elszámolási villamos fogyasztásmérők távleolvasásához külföldön széles körben alkalmazott keskenysávú PLC (villamoshálózati távközlés - Power Line Communication) technológia vivőfrekvenciái szintén a 2 - 150 kHz-es sávot használják az adatok továbbítására. Mivel a zavartűrési és zavarkibocsátási szintek, határok jelenleg nem definiáltak, ezért a készülékek, berendezések és kommunikációs rendszerek között olyan elektromágneses egymásra hatások keletkezhetnek, amelyek során megzavarhatják egymás helyes működését. Erre a jelenségre több ipari esemény is bizonyíték. A berendezések számosságának növekedésével az elektromágneses összeférhetőség biztosítása egyre nehezebbé válik. A témában szinte kizárólag angol nyelvű irodalom áll rendelkezésre, ezért a TDK dolgozatunk célja, hogy egy magyar nyelvű összefoglalót nyújtsunk a tématerület iránt érdeklődőknek a nemzetközi szakirodalmak alapján, valamint saját kutatásunk, laboratóriumi és helyszíni méréseink eredményeiről számoljon be. A dolgozatunkban foglalkozunk a témát érintő releváns irodalmakkal, ahol többek között bemutatjuk a 2 - 150 kHz sáv szabványosításának jelenlegi helyzetét, ismertetjük a közép/kisfeszültségű transzformátorok frekvenciafüggő jelátviteli jellemzőit. Ismertetjük továbbá azon vezetett zavar-vizsgálatok eredményeit is, amelyeket a 2 - 150 kHz frekvenciasávban végeztünk. Részletesen bemutatjuk a CIGRE JWG (Nagy Villamosenergia Rendszerek Egyesülése) C4.31 munkabizottság számára készített jelentéseinket, amelyek közül az egyik a Sellyén található közel 500 kW-os napelem-park vizsgálatát, a másik pedig a BME Villamos Energetika Tanszék Smart grid laboratóriumában található koaxiális visszavezető cső segítségével végzett, jellemzően kisfeszültségen használt sodronyok frekvenciafüggő karakterisztikájának mérését foglalja magába. Végül, de nem utolsó sorban foglalkozunk az elektronikus fogyasztásmérők említett frekvencia tartományba eső vezetett zavartűrésének szabványos vizsgálati módszerével.

## Abstract

---

Nowadays, the 2-150 kHz frequency range is represented as an unregulated range from the electromagnetic compatibility point of view. Immunity and emission levels, limits are not defined except some product standards. Several EMC standards exist for the DC-2 kHz range and for the radiofrequency band starting just above 150 kHz, but there is still a gap between them where ensuring EMC is a very hard task. With the development of power electronics, more and more device (e.g power inverters) are operating on the network, having emissions (e.g. harmonics of the switching frequencies) exactly in the mentioned frequency range. For remote meter reading electricity meters use Narrowband-PLC (Power Line Communication) technology mainly at abroad. The carrier frequencies of this technology also use the 2-150 kHz range for transferring data through the low-voltage network. As the immunity and emission levels, limits are not well defined now, devices, equipment and communication systems may interact with each other, and EMI (Electromagnetic interference) can occur. Several industrial examples exist for the presences of these EMI phenomenon. With the increasing number of these devices ensuring EMC is getting more complicated.

The aim of this paper is to provide a review for those who are interested in this topic, based on relevant literatures, including the actual situation of the standardization work and the frequency-dependent signal transmission of the medium/low voltage transformers in the 2-150 kHz range. We also disclose the results of some conducted test methods in the 2-150 kHz range. We present our test reports done for the CIGRE JWG (International Council On Large Electric Systems) C4.31 Working Group. The first one is the emission measurement of a solar park located at Sellye, having a nominal power of 500 kW. The other one is the measurement of the frequency-dependent characteristic of mainly low voltage wires, with the help of coaxial current return tube, done at the Budapest University of Technology and Economics's Smart Grid laboratory. And last but certainly not at least we present a standardized immunity test method to conducted disturbances for electricity meters in the mentioned frequency range.

## Köszönetnyilvánítás

---

Szeretnénk köszönetet mondani konzulenseinknek, Dr. Ladányi József és Dr. Varjú György Tanár Uraknak, akik dolgozatunk elkészítése során végig rendelkezésünkre álltak, kérdéseink, problémáink megoldásában szívesen segítettek, illetve lehetőséget adtak a párizsi székhelyű CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) WG-C4-31 nemzetközi szakmai tudományos munkabizottságban készülő „Ajánlás a közép- és kiefeszültségű villamosenergia rendszerek áramharmonikusainak értékelésére” c. dokumentum egyes részeihez tartozó helyszíni és laboratóriumi mérések lebonyolításában.

# Tartalomjegyzék

---

Összefoglaló .....	i
Abstract .....	ii
Köszönetnyilvánítás.....	iii
Tartalomjegyzék .....	iv
1 Bevezetés .....	6
2 EMC a 2 – 150 kHz frekvenciasávban .....	8
3 Szabványosítás .....	11
3.1 Zavarkibocsátás.....	11
3.2 Zavartűrés .....	12
3.3 Jelenlegi helyzet.....	13
3.3.1 A 2-9 kHz frekvenciasáv helyzete .....	14
3.3.2 A 9-30 kHz frekvenciasáv helyzete .....	14
3.3.3 A 30-150 kHz frekvenciasáv helyzete .....	14
4 Sodronyok frekvenciafüggő átviteli jellemzőinek mérése.....	16
4.1 A felületi impedanciák értelmezése.....	16
4.2 Mérési elrendezés.....	19
4.3 Mérőeszközök.....	20
4.3.1 Elgar SW 5550A tápegység .....	21
4.3.2 3FI-5A teljesítményerősítő .....	21
4.3.3 Picoscope 4227 hordozható oszcilloszkóp.....	22
4.3.4 Kézi multiméter .....	22
4.4 A mérés hibái .....	22
4.4.1 Induktivitás szegény sönt hibája.....	22
4.4.2 Áram mérőfej szöghibája .....	23
4.5 Mérési eredmények.....	25
4.5.1 25 mm <sup>2</sup> AASC sodrony .....	25

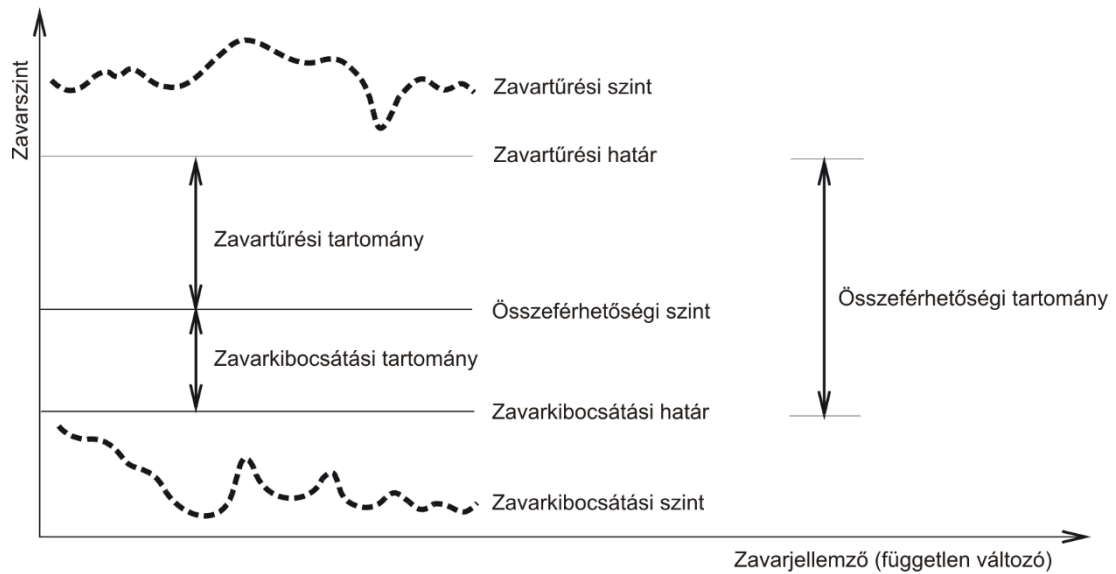
4.5.2	95 mm <sup>2</sup> AASC sodrony .....	28
4.6	Eredmények értékelése .....	33
5	Közép/kisfeszültségű transzformátor frekvenciafüggő átviteli jellemzői .....	34
6	Vezetett zavar vizsgálat naperőmű hálózatán.....	36
6.1	Sellyei napelem-park.....	36
6.2	Alkalmazott mérés technika .....	38
6.2.1	Feszültség-mérés .....	38
6.2.2	Áram-mérés .....	38
6.3	Vizsgálati eredmények .....	39
6.3.1	K50 kapcsolószekrény.....	39
6.3.2	E5 Elosztószekrény .....	41
6.3.3	Transzformátor .....	42
6.4	Konklúzió.....	43
7	Elektronikus fogyasztásmérők szabványos zavartűrési vizsgálata .....	44
7.1	Elektronikus fogyasztásmérők zavarérzékenysége .....	44
7.1.1	SWEDAC.....	44
7.1.2	NMi vizsgáló intézet.....	45
7.2	Zavartűrési vizsgálat.....	46
7.2.1	Vizsgálati jelalakok, szintek.....	46
7.2.2	Vizsgálati összeállítás.....	48
7.2.3	A vizsgálat alapvető lépései .....	50
7.3	Eredmények .....	51
8	Irodalomjegyzék .....	56

---

## 1 Bevezetés

---

Az elektromágneses összeférhetőség (EMC) egy külön tudománnyá nőtte ki magát a villamosmérnöki gyakorlatban. Célja a berendezések, vagy rendszerek zavarkibocsátásának és zavartűrésének olyan szintű összehangolása, koordinálása, hogy azok funkcionális romlás nélkül képesek legyenek egy adott környezetben egymás mellett működni. Az MSZ IEC 1000-1-1:1995 szabvány [1] szerinti megfogalmazásban az EMC nem más, mint *„valamely berendezésnek az a képessége, hogy elektromágneses környezetében kielégítően működjék anélkül, hogy környezetében bármi számára elviselhetetlen elektromágneses zavarást idézne elő.”* Az elektromágneses zavarást (EMI) előidéző elektromágneses zavarokat csoportosíthatjuk terjedési mód és frekvencia alapján is. A terjedési mód a zavarforrás és a zavarnyelő közti csatolási úttól függően lehet *vezetett*, ahol a zavarok vezetékes úton keresztül jutnak el a forrástól a nyelőig, vagy *sugárzott*, ahol a zavarok a térbe kisugározva elektromágneses hullámok formájában érik el a vevőt. Vezetett zavarjelenségek közé tartoznak például a harmonikusok, feszültségletörés, feszültségaszimmetria, szándékolt jelfeszültségek alkalmazása, vagy egyenáram jelenléte váltakozó áramú hálózaton. Ezen zavarok eredetét illetően megkülönböztetünk nem szándékolt- valamint szándékolt zavarkibocsátókat. Míg az előbbinél alapvetően a készülék működési elvéből adódóan juthatnak zavarok a hálózatra, (pl. inverterek hálózati visszahatásai a kapcsolási frekvencián, és azok többszörösein) amelyek ellen célszerű védekezni, addig az utóbbinál a jelfeszültséget szándékosan ültetik az 50 Hz-es hálózati jelre, jellemzően kommunikációs célból. A frekvencia szerinti felosztás esetén kis- és nagyfrekvenciás zavarokról beszélhetünk, amelyek közti határt Európában a 9 kHz jelenti [2]. Fontos, hogy megkülönböztessük az elektromágneses zavar (electromagnetic disturbance), és az elektromágneses zavarás (electromagnetic interference) kifejezéseket. Míg a zavarás a nemkívánatos romlásra (pl.: fogyasztásmérők befolyásolhatósága), addig a zavar a romlást előidéző elektromágneses jelenségre (pl.: nagyfrekvenciás felharmonikusok jelenléte) utal. Az elektromágneses összeférhetőség biztosításához szükséges, fontos alapfogalmak az 1-1. ábrán definiált módon értelmezhetőek egyetlen zavarforrás és egyetlen zavarnyelő esetén. Az ábrán a zavar szint nagysága látható – szabványosítás szempontjából leggyakrabban  $\text{dB}\mu\text{V}$ -ban kifejezve – egy független változó függvényében, ami a mi esetünkben a frekvencia.



1-1. ábra: Az EMC értelmezése az MSZ IEC 1000-1-1:1995 szabvány alapján

A **zavarkibocsátási szint** jelenti a készülék, berendezés vagy rendszer által kibocsátott adott elektromágneses zavar meghatározott módon mért szintjét.

A **zavarkibocsátási határ** a zavarforrásból eredő legnagyobb megengedett kibocsátási szint.

A **zavartűrési szint** egy meghatározott készüléken, berendezésen vagy rendszeren előírt módon keltett adott elektromágneses zavarnak azon legnagyobb szintje, amelynél nem következik be a működőképesség romlás.

A **zavartűrési határ** jelenti a megkövetelt legkisebb zavartűrési szintet.

Az **összeférhetőségi szint** pedig olyan előírt zavarszint, amelynél az elektromágneses összeférhetőség elfogadhatóan, nagy valószínűséggel teljesül [1].

Látható, hogy a készülékek zavartűrési határértékeinek, a saját, és a környezetében levő berendezések zavarkibocsátási határértékei fölött kell lenni ahhoz, hogy egymással elektromágnesesen összeférhetőek legyenek. Tulajdonképpen ez az, ami jelenleg a 2-150 kHz sávban nem biztosított minden esetben.

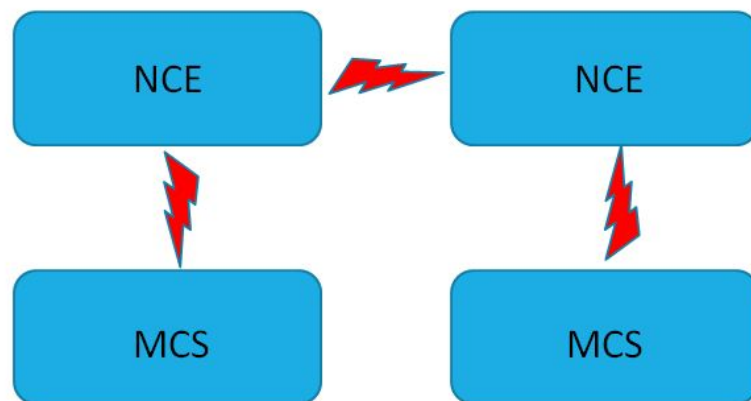


---

## 2 EMC a 2 – 150 kHz frekvenciasávban

---

Az okos hálózat (Smart Grid), és a hozzá szorosan kapcsolódó mérés-technikai, teljesítményelektronikai berendezések és kommunikációs rendszerek egyidejű találkozása miatt, egy új EMC probléma merült fel a 2-150 kHz-es frekvenciasávban, ahol az egyes berendezések, rendszerek által kibocsátott zavarok - akár nem szándékolt, vagy szándékolt – befolyásolhatják a készülékek helyes működését. Ez részben köszönhető egyrészt annak, hogy egyre több olyan teljesítményelektronikai berendezést alkalmaznak a hálózaton, amelyek zavarkibocsátása ebbe a frekvenciasávba esik. Ilyenek például az inverterek, szünetmentes tápegységek (UPS), kapcsolt üzemű tápforrások (SMPS). Másrészt számottevő mennyiségű villamos fogyasztásmérő adatkivételét végzik PLC (Power line communication) segítségével, ahol a kommunikáció vivőfrekvenciái is ebbe a tartományban találhatóak. Fontos megemlíteni azt a tényt is, hogy a szóban forgó frekvenciasáv EMC szabványosítása hiányos, nem befejezett folyamat. Alapvetően e három tény tette lehetővé olyan EMI problémák felbukkanását a 2-150 kHz frekvenciatartományban, mint például a fényerő szabályozható (dimmelhető) lámpák véletlen ki-be kapcsolása, helytelen PLC kommunikáció, okos mérők relatív mérési hibáinak osztálypontosságot meghaladó befolyásolása. A 2-150 kHz sávban jelentkező zavarás alapvetően a 2-1. ábrán látható készülékek és rendszerek között jöhet létre.



**2-1. ábra: Készülékek és rendszerek, amelyeket figyelembe kell venni a 2-150 kHz sávban jelentkező zavarás esetében**

Az első esetben a zavarás mindig két, kommunikációs készség nélküli berendezés (NCE) között jön létre, míg a másik két esetben a kommunikációs készség nélküli berendezés és a villamos hálózati kommunikációs rendszer (MCS) között, megkülönböztetve, hogy mikor melyik a zavar forrása valamint áldozata. Életszerű példa az első esetre, amikor a hálózati inverterek által keltett felharmonikus áramok a statikus fogyasztásmérő váltakozó áramú kapuján bejutva jelentős mérési hibákat eredményeznek. A második eset olyankor fordulhat elő, amikor kommunikációs készség nélküli berendezés és villamos hálózati kommunikációs rendszer egyidejű alkalmazásáról van szó, közel azonos frekvencián (inverter - PLC). A harmadik interferenciára (NCE - MCS) vonatkozólag pedig a végfelhasználói berendezések kapacitásai a

---

villamos hálózati kommunikáció hasznos jelét kisöntölhetik, így az nem tud eljutni a vevőhöz [3][4]. Mivel az elmúlt évtizedekben a 2-150 kHz sáv használata és vizsgálata nem állt a figyelem központjában, így egyre több olyan berendezés került a hálózatra, amelyek zavarkibocsátása a szabályozatlan sávba esik. Ennek egyik következménye pedig az lett, hogy a zavarérzékeny berendezések száma is növekedni kezdett. A zavarforrások és zavarálózatok feltárása érdekében a CENELEC (CLC) „Lakások és épületek elektronikus rendszere” tématerülettel foglalkozó CLC/TC 205 Műszaki Bizottság (TC) albizottsága (SC 205 A) lett megbízva azzal a feladattal, hogy vizsgálatokat indítsanak, valamint összegyűjtsék azon készülékek listáját, amelyek potenciális veszélyt jelenthetnek a 2-150 kHz sávban. Ennek megfelelően az SC 205 A bizottság 2010 áprilisában kiadott egy tanulmányt „*Electromagnetic Interferences between Electrical Equipment in the Frequency Range 2 to 150 kHz*” – címmel. A tanulmány megjelenését követő években azonban egyre több elektronikus berendezésről derült ki, hogy zavarkibocsátási szintjük annyira nagy lehet, hogy veszélyeztethetik más készülékek helyes működését, azaz meghaladhatják a védettségi szinteket. Megállapították, hogy a 2 – 150 kHz sávban terjedő vezetett zavarok eredete egyáltalán nem korlátozható csak azon berendezésekre, amelyeket az első tanulmány érintett. Ezek név szerint a fényerő szabályozható lámpák (zavarálózat), az inverterek (zavarforrás), valamint az Automatikus fogyasztásmérő leolvasó (AMR) rendszerek voltak, amelyek PLC kommunikáció segítségével gyűjtik össze az elszámolási fogyasztásmérés adatait. Ezért vált szükségessé egy kibővített második, majd később egy harmadik tanulmány kiadása is. A tanulmányok alapján elmondható, hogy a 2-150 kHz sávban kialakult EMC helyzetért leginkább az alábbi berendezések a felelősek a zavarkibocsátás szempontjából [5],[6]:

- PV Inverterek, frekvenciaváltók
- Villamos hálózati kommunikációs rendszerek (PLC)
- Szünetmentes tápegységek
- Hőszivattyúk
- PLC kommunikáció
- Egyszerű háztartási berendezések (mosógép, indukciós főzőlap)
- Kapcsolóüzemű tápegységek
- Elektronikus szabályozású fényforrások

A legfőbb zavarálózatok körébe pedig az alábbiak tartozhatnak [7]:

- PLC kommunikációval rendelkező okos mérők
- Kommunikációs készség nélküli elektronikus mérők
- Fényerő szabályozható lámpák
- PLC kommunikáció
- Háztartási berendezések (pl.: kávéfőző, mikrohullámú sütő)

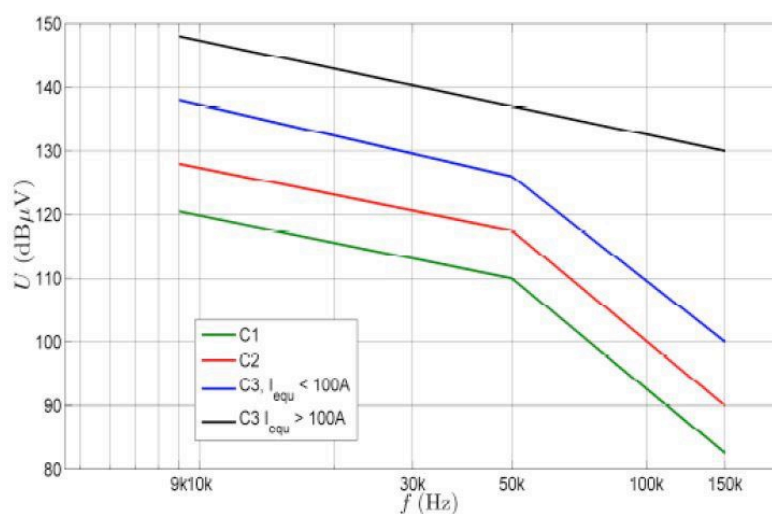
---

A csoportosítás és a 2-1. ábra alapján megállapítható, hogy a villamos hálózati kommunikációs rendszerek és természetesen a PLC kommunikáció is igen sajátos helyzetet képviselnek. Egyrészt zavarforrások lehetnek, méghozzá a jelfeszültsége révén kibocsátott szándékolt zavarok miatt, másrészt pedig zavar áldozatok, hiszen a 2-150 kHz sávban fellépő, más készülékek (pl.: hálózati inverterek) által kibocsátott zavarok befolyásolhatják a kommunikáció helyes működését, amelyek többek között adatvesztésben, vagy azok teljes hiányában nyilvánulhatnak meg. A készülékek növekvő mennyiségét, és a jövőbeli szerepüket figyelembe véve (Smart Grid) egyértelművé válik, hogy a 2-150 kHz sávban jelentkező EMI hatások kiküszöbölése végett a frekvenciasáv szabványosítása is szükséges.

## 3 Szabványosítás

### 3.1 Zavarkibocsátás

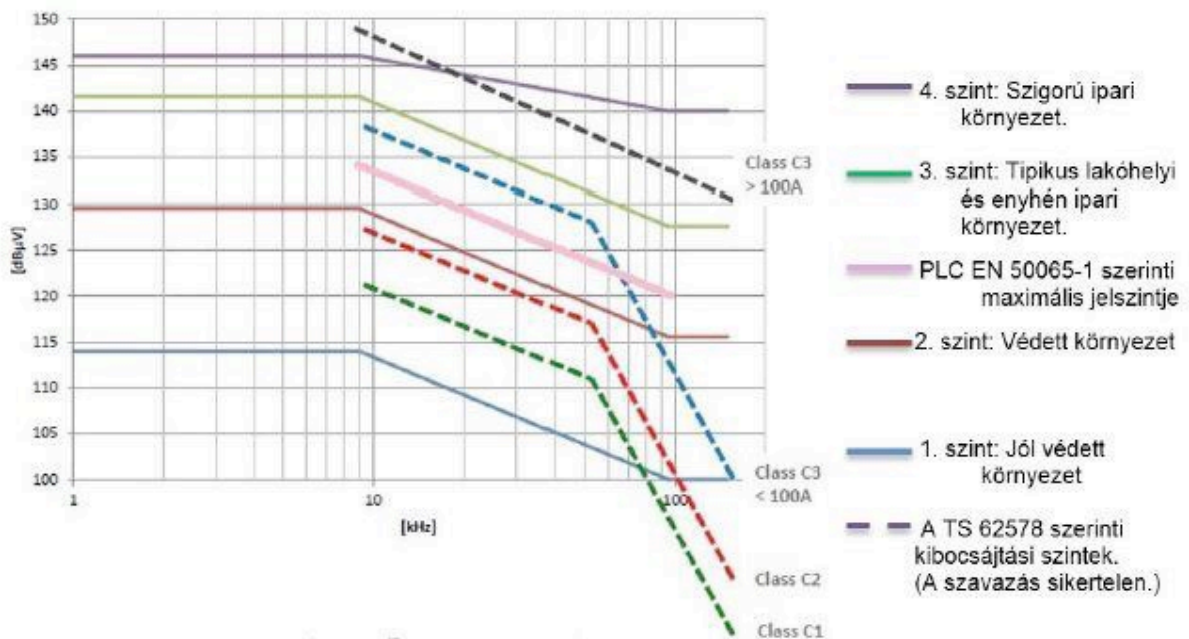
A zavarkibocsátási szintekre vonatkozóan csak néhány termék képez kivételt a 2-150 kHz sávban, amelyekre létezik szabvány által definiált határérték. Ilyenek például az indukciós főzőlapok és a világítási berendezések. Az elsőre az IEC CISPR 11:2015 [8], míg a másodikra az IEC CISPR 15:2013 [9] szabványokban vázolt határértékek vonatkoznak. A különböző közművek számára fenntartott CENELEC A (2-95 kHz) frekvenciasávban használatos PLC-k maximálisan megengedett jelszintjét az IEC 61000-3-8:1997 [10] és az EN 50065-1:2011 [11] szabványok definiálják. A zavarkibocsátási határokat érintő szabványok körében különleges pozíciót tölt be az IEC/TS 62578 Ed. 2 szabványtervezet [12], mely az aktív inverterek működési feltételei és jellemzői mellett, javaslatot tesz a tervezésükre és a 150 kHz alatti sávban a zavarkibocsátási határértékekre. Az aktív inverterek, mint fogalom alatt tulajdonképpen a teljesítményelektronikai berendezések egy általános megfogalmazását érti a szabványtervezet. Minden olyan teljesítmény átalakító, technológiai kialakítástól, mérettől és feszültség szinttől függetlenül, amelyek teljesítményt képesek mindkét irányba átalakítani (a.c/d.c vagy d.c/a.c), és teljesítménytényező szabályozására is alkalmasak. A szabványtervezet különlegessége két okból fakad. Az egyik, hogy a benne definiált zavarkibocsátási határértékek elég nagyok (3.1-1. ábra), amelyekre többek között az ESMIG (European Smart Metering Industry Group) és a „Készülékek villamos energia mérésére és szabályozására” tématerülettel foglalkozó CLC/TC 13 Műszaki Bizottság is felhívta a figyelmet, másrészt pedig a szabványtervezet olyan teljesítményelektronikai berendezések széles körét hivatott képviselni, amelyek jelentős zavarforrásként jelentkezhetnek a jelen és jövő villamosenergia hálózatában.



3.1-1. ábra: IEC/TS 62578 Ed. 2 által definiált zavarkibocsátási határértékek

## 3.2 Zavartűrés

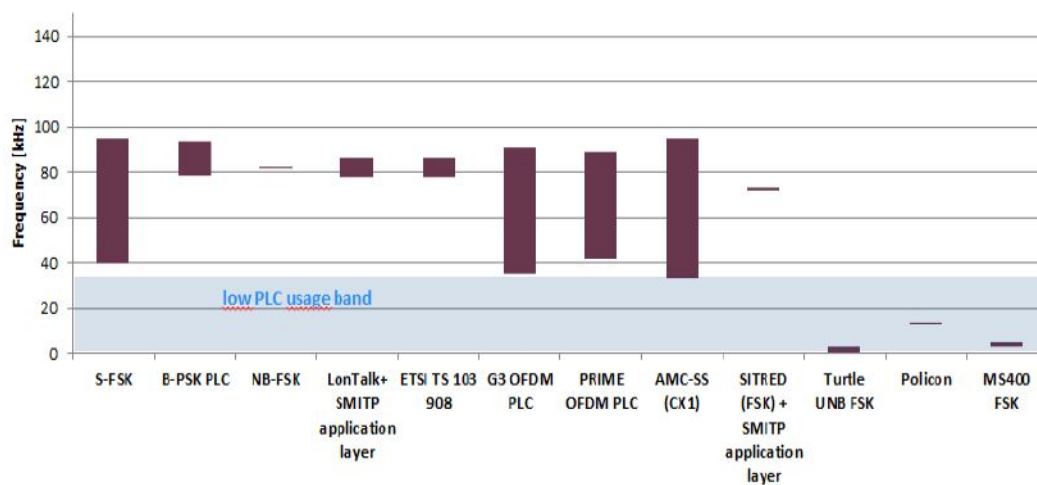
A zavartűrés szintekre vonatkozóan is hasonlóan hiányos a szabványosítás. A hálózati kommunikációs rendszerekkel kapcsolatosan az EN 50065-2 szabvány első [13] és harmadik [14] részébe foglalkozik ezekkel. A zavartűrés határértékek meghatározása mellett azonban szükséges olyan vizsgálati módszerek biztosítása is, amelyekkel igazolható a zavartűrés szinteknek való megfelelésség. A vezetett zavarok elleni zavartűrés vizsgálati módszerével két szabvány foglalkozik a 2-150 kHz sávban. Az egyik az IEC 61000-4-16:2015 [15], amely a közös módusú vezetett zavarok elleni vizsgálati módszerrel foglalkozik, a másik pedig az IEC 61000-4-19 [16] amely pedig a differenciális módusú vezetett zavarokéval. Ha megnézzük a 3.2-1. ábrát, melyben folytonos vonalak jelzik az IEC 61000-4-19:2014 szabvány által javasolt zavartűrés vizsgálat határértéket a különböző környezeti szinteknek megfelelően, látható, hogy az IEC/TS 62578 Ed. 2 szabványtervezet által definiált zavarkibocsátási szintek (szaggatott vonal) meghaladhatják a zavartűrés szinteket. Továbbá itt jól látható az is, miért lehet a PLC kommunikáció zavarforrás és zavar áldozat is egyben. Az EN 50065-1:2011 szabvány által meghatározott maximális PLC jelszintet meghaladja az IEC/TS 62578 Ed. 2 tervezet C3 zavarkibocsátási szintje, és a PLC jelszint meghaladhatja az IEC 61000-4-19:2014 szabvány védett és jól védett környezeti szintjeinek zavartűrését. Ennek megfelelően a szabványtervezetnek csak a többszörösen módosított változatát fogadták el, amelyben a javasolt zavarkibocsátási értékek átkerültek a tervezet tájékoztató mellékletébe. Itt ki is emelik, hogy az ott meghatározott vezetett zavarkibocsátási értékekre tett javaslatok megfigyelési és mérési eredményeken alapulnak, és eltérhetnek a megfelelő EMC bizottságok által javasolt maximális zavarkibocsátási értékektől [17].



3.2-1. ábra: Zavartűrés és zavarkibocsátási szintek

### 3.3 Jelenlegi helyzet

A 2-150 kHz sávban kialakult EMI helyzetben - ahol egyidejűleg használnak kommunikációs készséggel nem rendelkező berendezéseket és villamos hálózati kommunikációs rendszereket, közel azonos frekvenciákon - az EMC biztosítása a frekvenciasáv megfelelő szétválasztásával érhető el. A kisebb frekvenciákon a kommunikációs készség nélküli berendezések szükségleteinek megfelelően állítják be az összeférhetőségi szinteket. Az összeférhetőségi szintek relatíve nagyobbak lennének, így nagyobb nem szándékolt zavarkibocsátást megengedve az ebben a tartományban működő berendezések számára. A nagyobb frekvenciákon pedig a hálózati kommunikációs rendszerek szükségleteit biztosítanák úgy, hogy a nem szándékolt zavarok - beleértve a kapcsolási frekvenciák többszöröseit – megfelelően korlátozottak, kis értékűek legyenek. A CLC/TC 13 Műszaki Bizottság javaslata - miszerint az ideális határfrekvencia a két sáv között a 30 kHz - széles körben elfogadott, és szavazás útján érvényt nyert. Ennek oka, hogy a 2-30 kHz sávban - ahol a legnagyobb a nem szándékolt zavarkibocsátás - kevés MCS létesült, és az Európai automatikus fogyasztásmérő leolvasó rendszereket kiszolgáló PLC rendszerek vivőfrekvenciái kicsivel 30 kHz felett kezdődnek. [5].

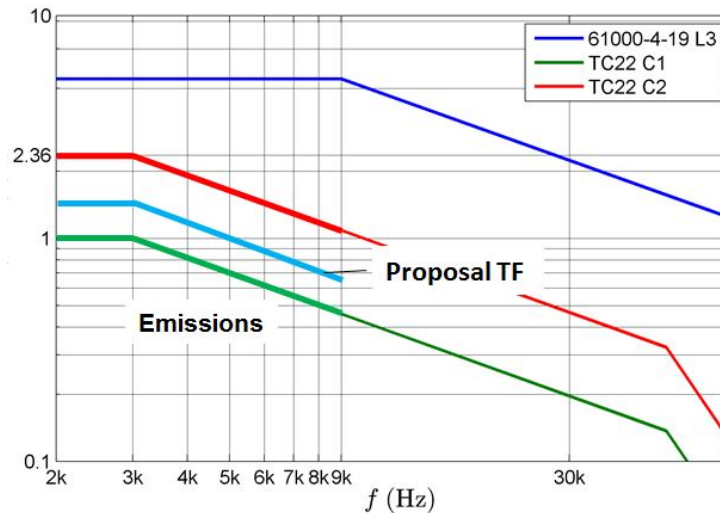


3.3-1. ábra: A főleg Európában használatos PLC sávok

A jelenlegi szabványosítási feladat tehát az említett frekvenciasáv szétválasztásának megfelelően a nem szándékolt zavarkibocsátók összeférhetőségi szintjének meghatározása, külön az alsó (2-9 kHz, 9-30 kHz) és felső (30-150 kHz) frekvenciasávra vonatkozólag. Az összeférhetőségi szintek meghatározásáért az EMC tématerülettel foglalkozó IEC (International Electrotechnical Commission) TC/77 albizottsága az SC/77A 8-as munkacsoportja (WG8) felelős. Az összeférhetőségi szintek definiálása után a zavarkibocsátási és zavartűrési határok koordinálása következik. Az összeférhetőségi szintek egy módosított IEC 61000-2-2 [18] szabványba kerülnek bele. A jelenlegi szabványban az összeférhetőségi szintek fejezet alatt mind a 3-20 kHz és 20-148,5 kHz-re vonatkozólag az áll, hogy „az összeférhetőségi szintek vizsgálat tárgyát képezik”.

### 3.3.1 A 2-9 kHz frekvenciasáv helyzete

Először a 2-9 kHz-es frekvenciasávra vonatkozólag született egyetértés az összeférhetőségi szintek meghatározásában. Itt az IEC TS 62578 Ed2. szabványtervezet C1 jelű zavarkibocsátási szint görbéjére történő illesztéssel határozták meg az értékeket, melyet az alábbi ábra is mutat.



3.3-2. ábra: Az összeférhetőségi szint a 2-9 kHz sávban a fázisfeszültség effektív értékek százalékos megadásával

A TC 13 véleménye szerint a nem szándékolt zavarok mérésügyi hatásait figyelembe véve a javasolt értékek elfogadhatóak, pontosan a 30 kHz választási frekvenciára tett javaslatuk végett, mely szerint Európában ebben a sávban nem nagyon használnak hálózati kommunikációt, ezért a mérőkre gyakorolt hatást nem kell figyelembe venni. Megjegyzendő, hogy a hangfrekvenciás körvezérlés szabvány szerinti frekvenciasávja 110 Hz és 3000 Hz között lehet.

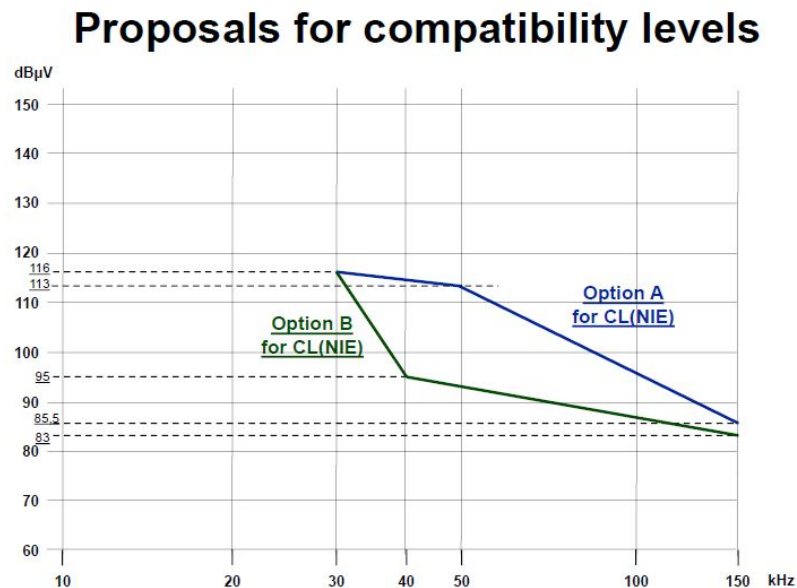
### 3.3.2 A 9-30 kHz frekvenciasáv helyzete

A 9-30 kHz-es sávra vonatkozóan is sikerült konszenzusra jutni az összeférhetőségi szintek meghatározásában. Itt az összeférhetőségi szint 3,5 dB-el halad az IEC TS 62578 Ed.2 C1 jelű görbéje felett. Pontos értéke 9 kHz-nél 123,5 dBμV majd 30 kHz-ig lineárisan csökken, ahol értéke 116 dBμV. A szintek egy kicsit nagyobbra lettek beállítva, mint amire a TC 13 számított, de elfogadhatónak tűnik az előző pontban említettek miatt.

### 3.3.3 A 30-150 kHz frekvenciasáv helyzete

A 30-150 kHz-es sávra vonatkozóan viszont még nem született megállapodás, hiszen itt a legnehezebb beállítani úgy az összeférhetőségi szinteket, hogy utána a zavarkibocsátás és védettségi határok jól koordinálhatóak legyenek. A nehézséget az okozza, hogy ebbe a sávban pontosan belesznek az inverterek kapcsolási frekvenciáinak többszöröse, valamint a PLC-k vivőfrekvenciái is. Ennek megfelelően 2 külön javaslat született. A javaslatok hűen tükrözik a különböző érdekeket. Ezt követően az SC77A WG8 kiadott

egy összefoglaló dokumentumot a két javaslattal kapcsolatosan, melyben arra kérte a témában érintett Nemzeti Bizottságokat, hogy véleményezzék a kialakult helyzetet, és hogy alternatív megoldásokat javasoljanak abban az esetben, ha egyik opció sem elfogadható. A két javaslat a 3.3-3. ábrán látható.



**3.3-3. ábra: Két lehetséges összeférhetőségi szint a 30-150 kHz sávra vonatkozóan (SC 77A)**

Az „A” javaslatot olyan szakértők támogatják, akik ipari, hálózati használatra állítanak elő teljesítményelektronikai berendezéseket, nagyobb zavar szinteket megengedve a 30-150 kHz sávban és ezzel biztosítva maguknak azt az előnyt, hogy ne kelljen további szűrőberendezéseket használniuk. A „B” javaslatot az elosztó hálózati engedélyesek és a hálózati kommunikációs eszközök gyártói, valamint a mérőgyártók támogatják, amely kisebb zavar szinteket engedne meg, biztosítva ezzel a helyes PLC működést és megvalósítva ezzel a korrekt automatikus mérőleolvasást. Mindkét javaslat mellett erős lobbifolyik a saját érdek érvényesítése végett. Egyesek véleménye szerint, a végső megoldást a CENELEC frekvenciasáv kiterjesztése jelenti a nagyobb frekvenciák (500 kHz) felé. A 150 – 500 kHz tartomány még mindig alkalmas a PLC kommunikációra, és a kommunikáció jel-zaj viszonya is jelentősen javulna. Ez irányú elmozdulás már érzékelhető a G3-PLC felől, aki gyárt PLC-s hálózati kommunikációs technológiát ebben a sávban, valamint a Swemet cég vizsgálóberendezést is fejlesztett a sáv vizsgálatára. [19],[20],[24].



---

## 4 Sodronyok frekvenciafüggő átviteli jellemzőinek mérése

---

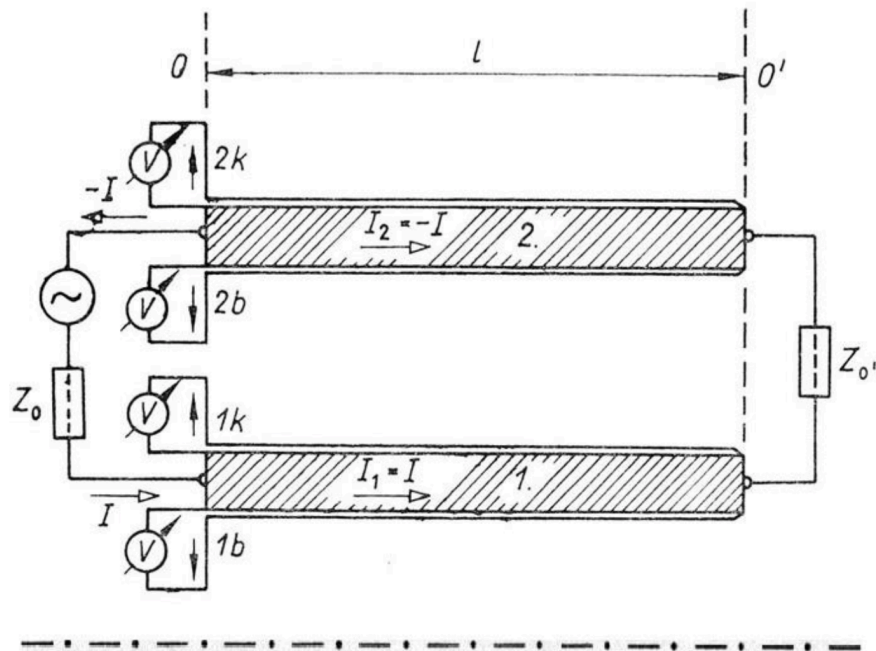
Mint arra a [21] is felhívja a figyelmet, igen kevés ismerettel rendelkezünk a 2 – 150 kHz frekvenciatartományban lévő jelenségekről. A szabványosítás elvégzéséhez nem elég csupán a zavar forrásokat és nyelőket ismerni, a zavarok terjedését is szükséges vizsgálni. Ehhez elengedhetetlen az átviteli út jellemzőinek minél részletesebb ismerete is. Mivel az interferencia jelenségek nagy részét a közcélú kitesztelt hálózaton regisztrálták, ezért különösen fontos ezen hálózati rész átviteli jellemzőinek vizsgálata, így pl. a sodronyoké.

A szakirodalomban eddig nem volt adat sodronyok átviteli jellemzőiről ebben a frekvencia tartományban. Analitikus kifejezésekkel csak tömör, kör keresztmetszetű vezető, üreges vezető (cső), illetve végtelen homogén féltér ellenállása és induktivitása számítható. A hálózaton használt sodronyok több elemi szálból állnak, ráadásul a külső rétegek elemi szála rá vannak sodorva a belsőbb rétegekre, emiatt ezek elrendezése változik annak függvényében, hogy melyik keresztmetszetet vizsgáljuk. Emiatt tisztán matematikai úton nem számíthatók. Az átviteli jellemzők megismerésére így a mérés, valamint a szimuláció marad, illetve az eredmények hitelesítése érdekében leginkább a kettő párhuzamos alkalmazása és összevetése.

### 4.1 A felületi impedanciák értelmezése

A felületi impedanciák értelmezését a [22] irodalom alapján végeztük.

A felületi impedanciák fogalmát legáltalánosabban két koaxális csőből álló áramkörön lehet értelmezni, melynek keresztmetszeti képe a 4.1-1. ábrán látható.



4.1-1. ábra: Felületi impedanciák értelmezése két koaxiális csőből álló áramkörön

Legyen a csövek végpontja (O és O') közti szakasz  $l$  hosszúságú, továbbá az 1. és 2. cső egymásnak kölcsönös visszavezetései. Észrevehető, hogy a két cső áramköri elrendezésében a következő különbség van: még az 1-es cső árama külső visszavezetéssel a 2-es csövön záródik, addig a 2-es cső árama belső visszavezetéssel az 1-esen. Így az 1-es csövön a külső visszavezetéssel, még a 2-es csövön a belső visszavezetéssel adódó felületi impedanciát értelmezhetjük.

Mivel a cső falán belül általában nem egyenletes az árameloszlás (pl. skin hatás miatt), ezért mind külső, mind belső felületi impedancia is értelmezhető. Két koaxiális csőből álló elrendezés esetén az így létrejött 2-2 lehetőségből egy felületi impedancia értelmezhető. Ezek definíció szerint a következők:

- Belső felületi impedancia, belső visszavezetéssel:

$$Z_{bb} = \frac{U_{2b}}{I}$$

- Belső felületi impedancia, külső visszavezetéssel:

$$Z_{bk} = \frac{U_{1b}}{I}$$

- Külső felületi impedancia, belső visszavezetéssel:

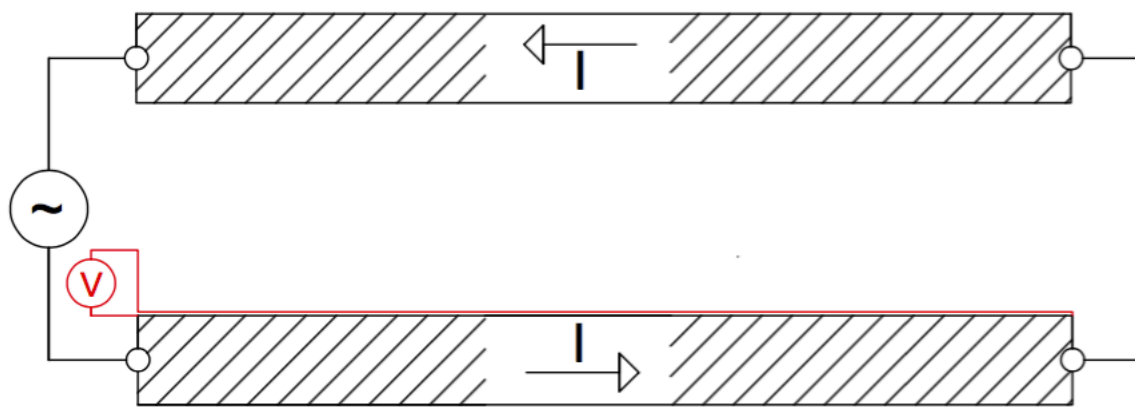
$$Z_{kb} = \frac{U_{2k}}{I}$$

- Külső felületi impedancia, külső visszavezetéssel:

$$Z_{kk} = \frac{U_{1k}}{I}$$

Megjegyzendő, hogy ez a legáltalánosabb eset, melynek a legbonyolultabb elrendezések is értelmezhetők. Ilyen például egy páncélozott kábel, ahol a belső cső a kábel erének, a külső a páncélozásnak feleltethető meg. Mivel mi nem ilyen elrendezéseket szeretnénk mérni, hanem a kisméretű elosztóhálózaton tipikusan használt sodronyokat, ezért célszerű a felületi impedancia fogalmát erre vizsgálni.

A fentieket végig gondolva sodronyok esetén a következőre jutunk: mivel ezek nem üregek, ezért a négy impedancia közül csak a külső felületi impedancia, külső visszavezetéssel értelmezhető. Ilyenkor a külső felületi impedanciát belső felületi impedanciának is nevezik, utalva rá, hogy ez a vezetők belüli feszültségese, valamint az átfolyó áram hányadosaként van definiálva. Sodronyok esetén a felületi impedancia mérési vázlatát a 4.1-2. ábrán látható.



4.1-2. ábra: Sodronyok felületi impedanciájának mérési vázlatát

A 4.1-2. ábrán az alsó sraffozással ellátott téglalap a vizsgált sodrony, melyet teljes egészében ábrázoltunk. Ennek középvonalára forgásszimmetrikus az elrendezés. A felső sraffozott téglalap a külső visszavezető csövet ábrázolja, mely a valóságban teljesen körbe veszi a vizsgált sodronyt.

Az olyan nem ferromágneses vezetők, amelyek egymáshoz, illetve a csövekhez egyáltalán nem, vagy csak egy ponton kapcsolódnak, nem változtatják meg az elrendezés villamos- és mágneses állapotát. Ezt a tényt kell kihasználnunk, hogy a felületi impedancia értelmezhetővé és mérhetővé váljon a következőképpen: csatlakoztassunk a sodrony egyik végén a felületéhez egy vékony vezetőt, majd vezessük végig a sodrony egyik alkotóján. A vezeték ezen része legyen szigetelt. Figyeljünk továbbá arra is, hogy a vezeték minél jobban simuljon rá a vizsgált sodronyra (mint pl. a 4.1-2. ábrán a piros vonal). Ezek után helyezzünk el egy feszültségmérőt, mely a sodrony felületén létrejött feszültségesezt mér. A körbe  $I$  áramot injektálva a sodrony belső impedanciáját a következő összefüggés segítségével kaphatjuk meg:

$$Z_b = \frac{U_{m\acute{e}rt}}{I}$$

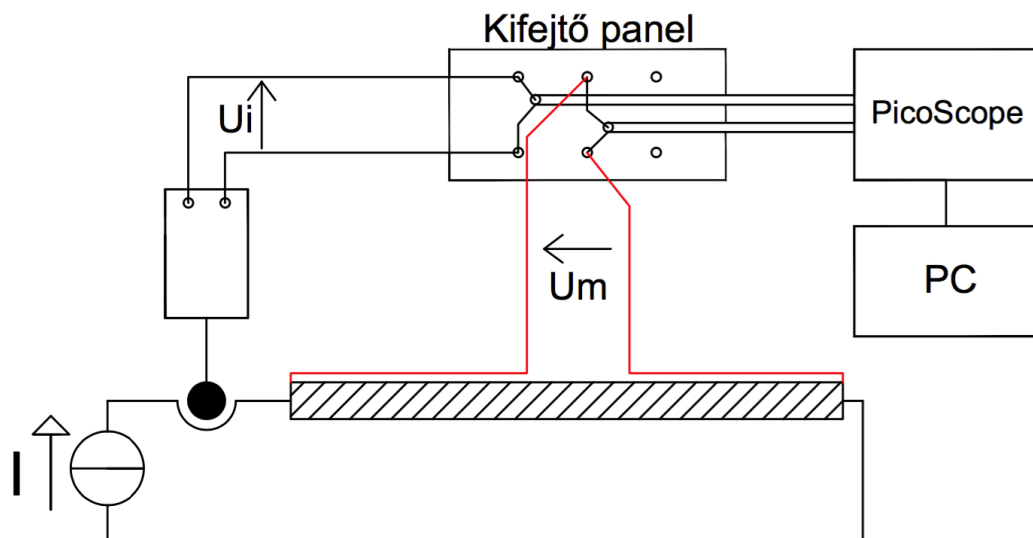
, ahol:

$U_{\text{mért}}$ : a feszültségmérő által mutatott érték

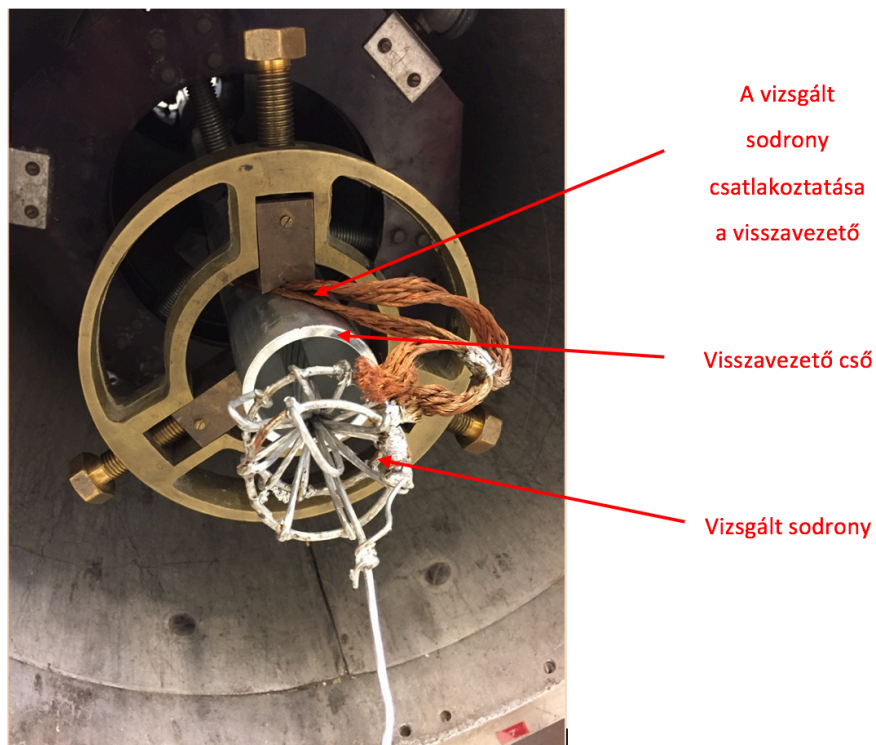
$I$ : a sodronyon folyó áram

## 4.2 Mérési elrendezés

Az 4.1 fejezetben ismertetett elmélet alapján a mérési elrendezés már megtervezhető és összeállítható. A vizsgálati elrendezés elvi kapcsolási rajza az 4.2-1. ábrán, a gyakorlati megvalósítás az 4.2-2. ábrán látható.



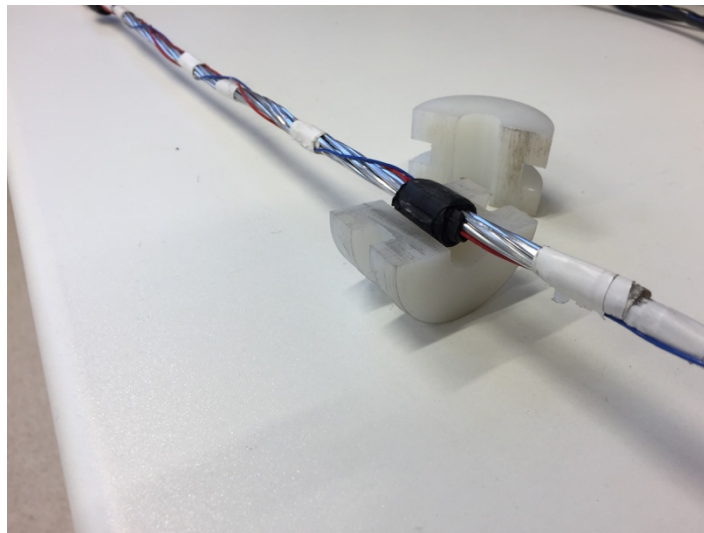
4.2-1. ábra: Sodronyok felületi impedanciáinak méréséhez használt elrendezés (elvi)



4.2-2. ábra: Sodronyok felületi impedanciáinak méréséhez használt elrendezés, benne a 95 mm<sup>2</sup>-es AASC sodronnyal (megvalósítás)

---

Mivel a visszavezető cső hossza 316 cm, így a vizsgálandó sodronyból egy ekkora darabra van szükség. A mérést megelőző előkészítő fázisban a sodrony felületén elhelyztünk 3 db felületi vezetőt: egyet az alkotóján, melyre a továbbiakban *egyenes* vezetőként hivatkozom, egyet a sodrony külső rétegének menetemelkedését követve (továbbiakban *egyirányú* vezető), illetve egyet a külső réteg menetemelkedését követve, de azzal ellentétes tekerceselési irányút (továbbiakban *ellenirányú* vezető). Ezután a vizsgált sodronyt elhelyztük egy 5 cm átmérőjű alumínium cső belsejében, mely a külső áramvisszavezetést valósította meg. Megjegyzendő, hogy a külső visszavezetést célszerű a vizsgált sodronyhoz minél közelebb hozni, hiszen így a visszavezetéssel képzett kölcsönös impedancia csökkenthető, ezáltal ugyanakkora teljesítménnyel nagyobb mérőáram injektálható az áramkörbe. Ez lényegesen javítja a mérés pontosságát. Annak érdekében, hogy a hossz mentén ne jöjjön létre galvanikus kapcsolat a sodrony és a visszavezető cső között, ezért kb. 15-20 cm-enként két összeilleszthető, félkör alakú műanyag papucsot helyeztünk a sodrony köré. Egy távtartó műanyag papucs, illetve a különböző irányú felületi vezetők elhelyezése a 4.2-3. ábrán látható a 25 mm<sup>2</sup>-es AASC sodrony esetén.



**4.2-3. ábra:** Távtartó műanyag papucs a 25 mm<sup>2</sup>-es AASC sodronnyal, a sodronyon különböző irányú felületi vezetőkkel

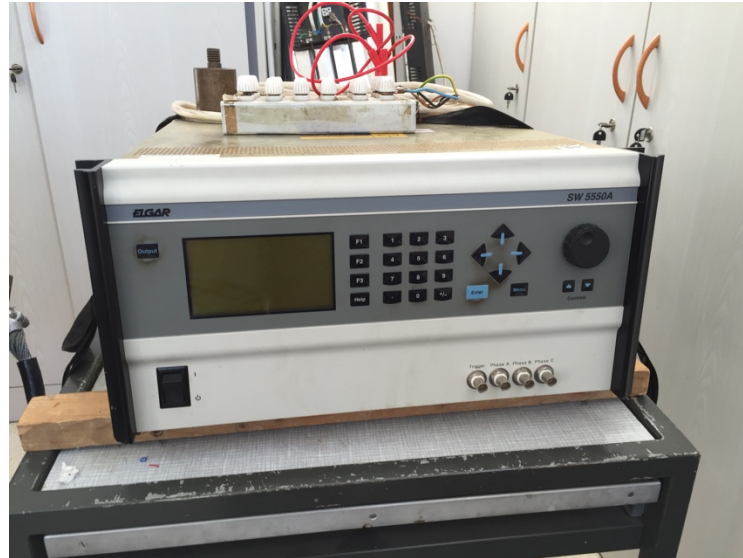
A méréshez frekvenciától függően választottunk tápegységet, illetve áramnemtől függően mérőeszközöket (pl. oszcilloszkóp, multiméter). Ezekkel a megfelelő feszültségek és áramok nagyságát, valamint fázisszögét mértük.

### 4.3 Mérőeszközök

A 4.2. fejezetben láthattuk az elvi mérési elrendezést. Ebben a fejezetben a megvalósításhoz használt eszközöket mutatjuk be (pl. tápegység, mérőberendezés, stb.).

### 4.3.1 Elgar SW 5550A tápegység

Az Elgar SW 5550A (4.3-1. ábra) egy programozható tápegység, melyet a kisebb frekvenciákon használtunk fel. DC – 8200 Hz között tetszőleges frekvenciájú egy – és háromfázisú gerjesztést lehet vele előállítani. Három kimenete parallel is köthető, így maximálisan 24 A áram kiadására képes.



4.3-1. ábra: Elgar SW 5550A

### 4.3.2 3FI-5A teljesítményerősítő

Ez egy tanszéki fejlesztésű tápegység (4.3-2. ábra), mely Dr. Kisvölcssey Jenő vezetésével készült. Felépítését tekintve egy vezérlő egységből és egy teljesítményerősítőből áll. A vezérlő doboz USB-n keresztül csatlakoztatható számítógéphez, ahonnan a saját programjával állíthatók a paraméterek. Ez az eszköz 400 Hz fölötti gerjesztést tud előállítani, maximum 5 A kimeneti árammal.



4.3-2. ábra: 3FI-5A teljesítményerősítő

---

### 4.3.3 Picoscope 4227 hordozható oszcilloszkóp

A váltakozóáramú mérésekhez egy két csatornás digitális oszcilloszkópot használtunk. Mivel a készülék nem rendelkezik képernyővel, ezért USB kábelen keresztül csatlakoztatható PC-hez, ahol saját szoftverével lehet a mért jeleket megjeleníteni, kiértékelni, illetve a beállításokat módosítani.

### 4.3.4 Kézi multiméter

Mivel mind a mérőfej, mint az erősítő csak váltakozóáramú mérésekhez használható, ezért az egyenáramú ellenállás méréséhez kézi multimétert használtunk az áram és felületi feszültség méréséhez.

## 4.4 A mérés hibái

A 4.1 és 4.2 fejezet alapján látható, hogy a mérési elv nagyon egyszerű: adott áram esetén egy feszültség mérésével megkaphatjuk az adott áramra és frekvenciára jellemző belső impedanciát. A gyakorlat azonban nem ilyen egyszerű, mivel a vizsgálat hibákkal terhelt. Ezek sokszor egybeesnek a mérendő mennyiségek nagyságrendjével, így különösen igaz a következő mondás:

*„Sokféleképpen lehet rosszul mérni, de csak egyféleképpen lehet majdnem jól”. – Dr. Varjú György*

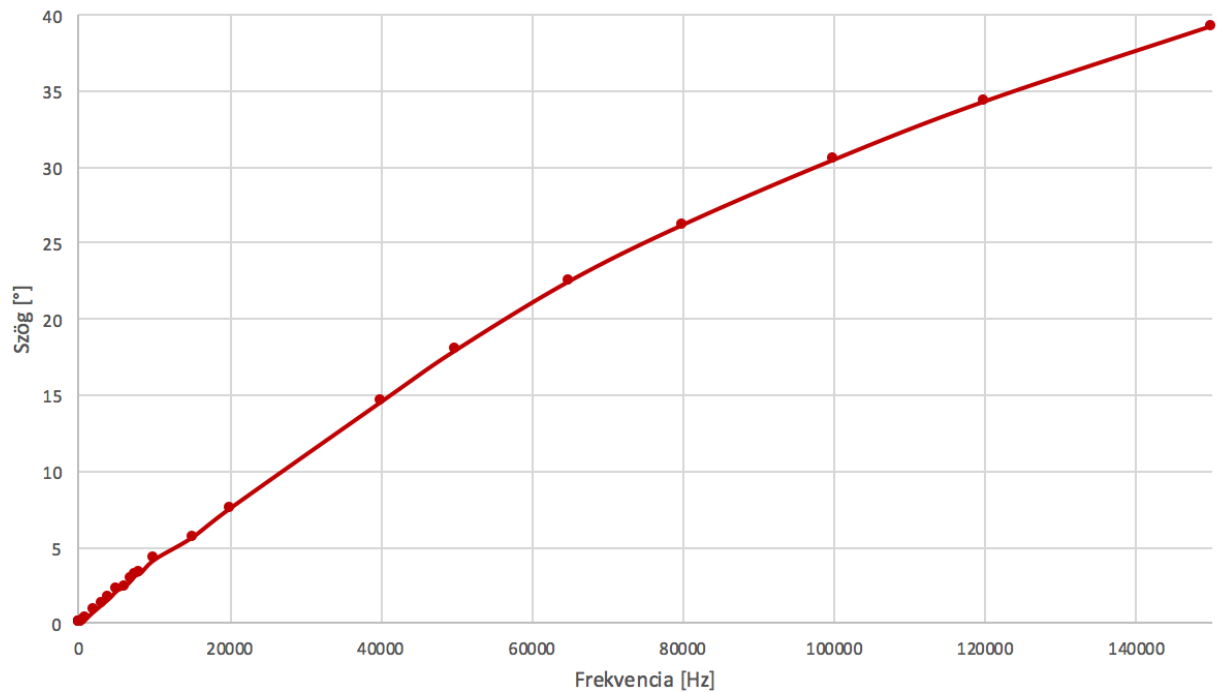
Tipikusan igaz ez az impedancia fázisszögére, ahol gyakorlatilag nagyobb frekvenciákon a mérendő szögnél nagyobb az áram mérőfej szöghibája.

Ezek a hibák természetesen nem engedhetők meg, így a feladat első körben az áram mérőfej szöghibájának meghatározása a 2 – 150 kHz tartományra. Ennek ismeretében a mért felületi impedancia értékek korrigálhatók lesznek.

### 4.4.1 Induktív szegény sönt hibája

Ahhoz, hogy egy tetszőleges sodrony felületi impedanciáját le tudjuk mérni, a 4.4. fejezet alapján szükséges a vizsgálathoz használt áram mérőfej szöghibáját meghatározni az egyes frekvenciákon. Az erre a célra kitalált elrendezés a 4.4.2. fejezetben kerül ismertetésre. Előzetesen megjegyezzük, hogy a mérési összeállítás része egy induktív szegény sönt, mely referenciaként szolgál az áram mérőfej szöghibájának meghatározásakor. Ebben a frekvencia tartományban azonban a precíziós söntök sem viselkednek tisztán ohmos tagként, így először a tényleges impedanciát kell meghatározni az egyes frekvenciákon.

A méréshez az EBG osztrák cég által gyártott PCS60 típusú precíziós söntöt használtuk. Mivel a Villamos Energetika Tanszék nem rendelkezik impedancia analizátorral, ezért ezt az Automatizálási és Alkalmazott Informatika Tanszék teljesítményelektronikai laboratóriumában található Wayne Kerr 6440B készülékével végeztük. Ez a műszer 20 Hz – 500 kHz tartományban, diszkrét pontokban tud impedanciát mérni, így a kívánt tartományt lefedte. A mérés eredménye az 4.4-1. ábrán látható.



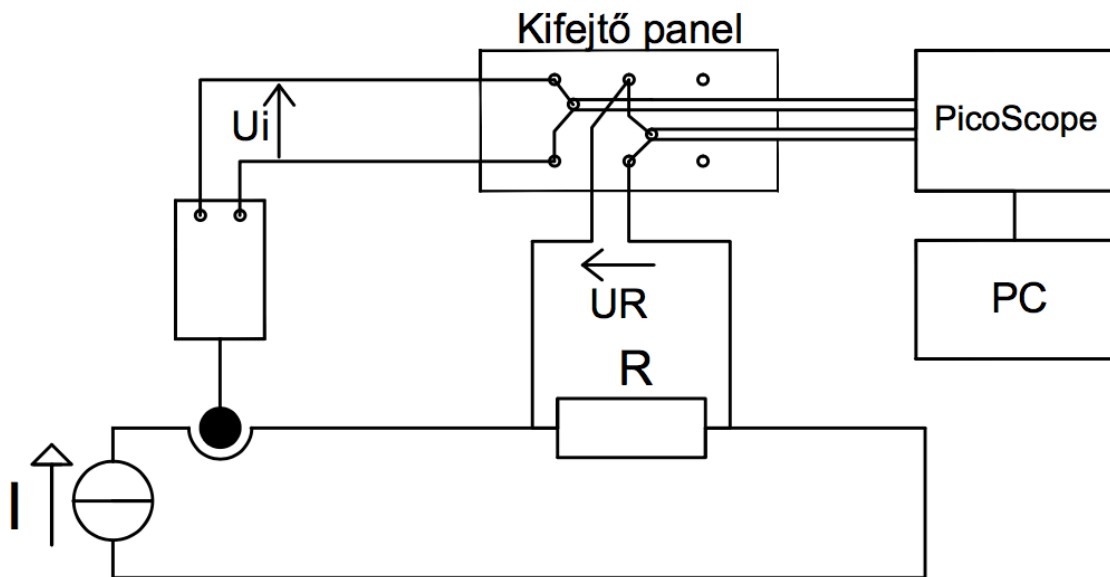
**4.4-1. ábra: A felhasznált söntimpedancia szöghibája**

Látható, hogy a precíziós sönt valóban csak kis frekvenciákon modellezhető ellenállásként, a frekvencia növelésével az induktív reaktancia egyre dominánsabb lesz.

#### 4.4.2 Áram mérőfej szöghibája

Mivel a sodronyok méréséhez a koaxiális visszavezető cső saját áram mérőfejét szeretnénk használni, ezért szükséges ennek szöghibáját ismerni. Ez a sönt hibájának ismeretében már könnyen megtehető. A mérési elrendezés a 4.4-2. ábrán látható.





4.4-2. ábra: Áram mérőfej szöghibájának méréséhez használt elrendezés

Az elrendezés lényege, hogy a mérőfejen, valamint az ellenálláson is azonos áramot hajtunk át, majd oszcilloszkóp segítségével mérjük a két jelölt feszültség között kialakuló fázisszöget (időtölésos alapú fázisszögméréssel). Abban az esetben, ha a mérőfejnek nem lenne szöghibája, akkor rajta, valamint a söntön a feszültségnek fázisban kellene lenni. Ez azonban nem így van, mivel a mérőfej nem ideális elem. A fenti elrendezés segítségével a hiba a következőképp számítható ki:

$$\varphi_h = \varphi_{mért} - \varphi_R$$

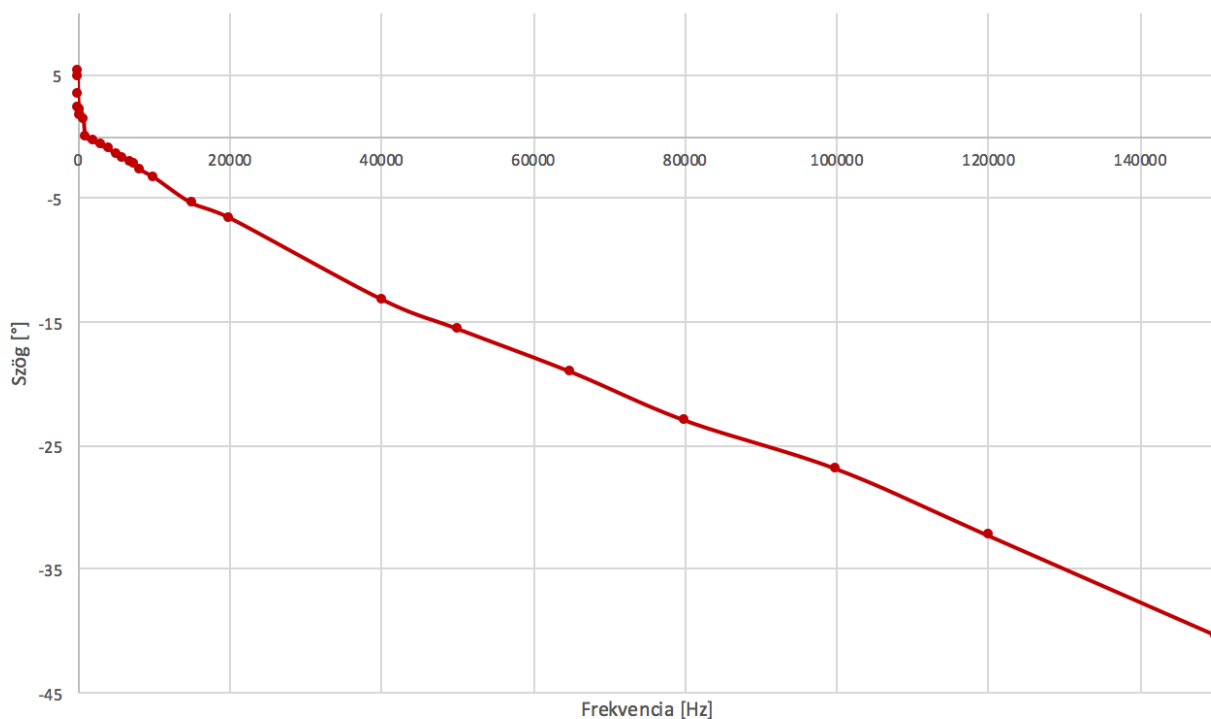
ahol:

$\varphi_h$ : a mérőfej hibája

$\varphi_{mért}$ :  $U_R$  és  $U_i$  között mért szög

$\varphi_R$ : az induktivitás szegény söntellenállás impedanciájának szöge

Az összefüggést minden diszkrét mérési frekvencián alkalmazva az 4.4-3. ábrán látható eredményre jutunk.



4.4-3. ábra: Áram mérőfej szöghibája

## 4.5 Mérési eredmények

### 4.5.1 25 mm<sup>2</sup> AASC sodrony

#### 4.5.1.1 Egyenáramú ellenállás

A mérés a 4.2. fejezetben leírtaknak megfelelően történt az Elgar tápegységgel, illetve a kézi multiméterekkel. Az egyenáramú ellenállást különböző gerjesztésekkel mérve a 4-1. táblázat szerinti eredményeket kaptuk.

4-1. táblázat: Egyenáramú ellenállás, hosszegységre eső ellenállás több gerjesztéssel mérve

I [A]	U [mV]	R [mΩ]	r [Ω/km]
4,95	19,5	3,94	1,234
6,75	26,7	3,96	1,242
9,9	38,8	3,92	1,231

A hosszegységre eső ellenállás átlagos értéke a mérések alapján 1,2364 Ω/km.

A mérés validálása érdekében az eredményeket kézi számítással is ellenőriztük. A 25 mm<sup>2</sup> AASC sodrony egy középső és hat külső elemi szálból áll. Egy elemi szál átmérője tolómérővel mérve  $d = 2,1$  mm-nek adódott. Az AASC anyag fajlagos ellenállát  $\rho_{AASC} = 27 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{km}$ -nek feltételezve a középső elemi szál ellenállása:

---

$$R_{belső} = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} = 29,088 \text{ m}\Omega$$

A sodrony külső elemi szálai rendelkeznek menetemelkedéssel is, melyet nem hanyagolhatunk el az ellenállás számításánál. Ezt figyelembe véve egy külső elemi szál ellenállása:

$$R_{külső} = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} + \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{l_m} \cdot \frac{2r_k \pi}{A} = 31,487 \text{ m}\Omega$$

, ahol:

$r_k$  : közepes sugár = 2,1 mm

$l_m$  : külső szál menetemelkedése = 16 cm

A vizsgált sodrony eredő ellenállása:

$$\frac{1}{R_{eredő}} = \frac{1}{R_{belső}} + 6 \cdot \frac{1}{R_{külső}} \rightarrow R_{eredő} = 4,445 \text{ m}\Omega$$

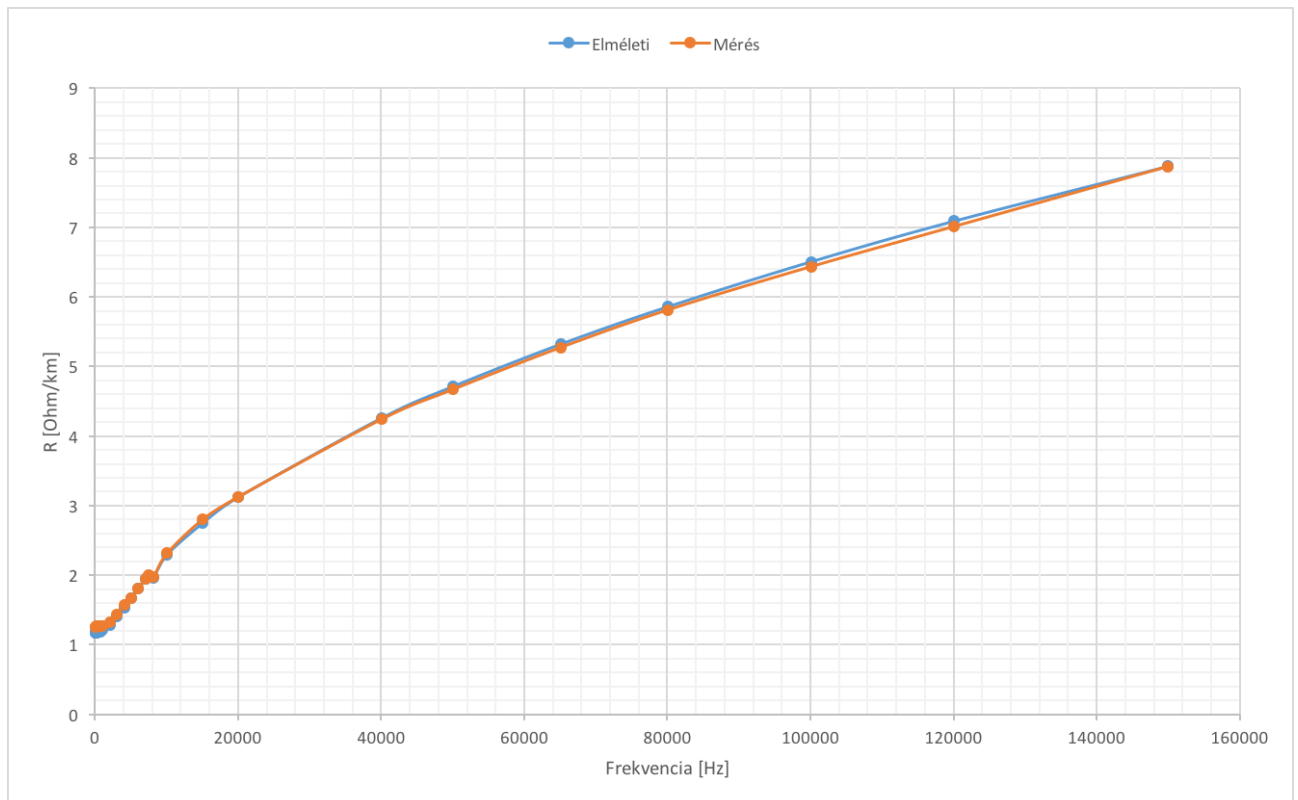
Ebből a hosszegységre eső ellenállás:

$$r_{25,AASC} = \frac{R_{eredő} [\text{m}\Omega]}{l [\text{m}]} = 1,434 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

#### 4.5.1.2 Váltakozóáramú felületi impedancia

A mérés a 4.2. fejezetben leírtak szerint történt 40 Hz és 150 kHz között.

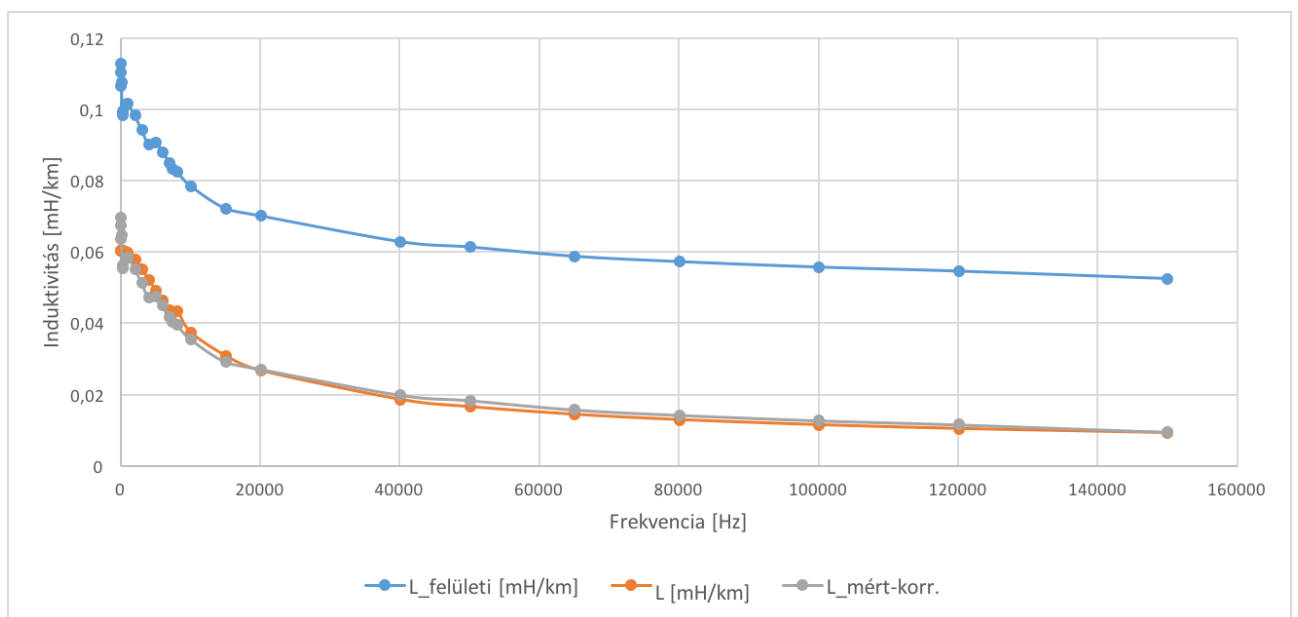
A vizsgált sodrony ellenállása a 4.5-1. ábrán látható.



4.5-1. ábra: A 25mm<sup>2</sup> AASC sodrony ellenállása

Az ábrán látható, hogy DC-hez közeli értékeken a mért érték megegyezik az előző fejezetben mért eredményekkel, még nagyobb frekvenciákon az áramkiszorítás jelensége miatt az ellenállás nő.

A vizsgált sodrony induktivitása a 4.5-2. ábrán látható.



4.5-2. ábra: A 25mm<sup>2</sup> AASC sodrony öninduktivitása

Az ábrán a narancs színű görbe az elemi vezetők módszerével, elméleti úton a Tanszéken meghatározott induktivitást jelöli, még a kék az általunk mért értékeket. Látható, hogy a két görbe nem egyezik meg, köztük körülbelül egy konstans eltérés mérhető. Ennek oka, hogy a mérésünk csak akkor adna teljesen pontos eredményt, ha a vizsgált sodronyon elhelyezett felületi vezető minden pontban szorosan illeszkedne a sodronyra, ugyanakkor teljesen el is lenne szigetelve tőle. Mint azt már a fejezetben is említettem, ez a feltétel egyszerre nem teljesíthető. Továbbá mivel a felületi vezetőt a sodronyhoz csak diszkrét pontokban rögzítettük (kb. 15 cm-enként), így azokon a részeken, ahol ezt nem tettük meg, a felületi vezető még távolabb is kerülhet a sodronytól.

A fenti két tényező együtt egy járulékos induktivitást hoz a mérési eredményekbe, melyet a számítás során figyelembe kell venni. Ennek értéke a 25 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű AASC sodrony esetén a következő:

$$L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} = 0,2 \cdot \ln\left(\frac{3 + d}{3}\right)$$

, ahol

$L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$  a járulékos külső induktivitás értéke

$d$  a sodrony felülete és felületi vezető egyenértékű távolsága

Érzékeltetésképpen a fenti képletbe pár értéket behelyettesítve a következő járulékos külső induktivitás értékek adódnak (4-2. táblázat).

**4-2. táblázat: Járulékos külső induktivitás értéke különböző felületi vezető - sodrony távolságokra**

<b>d</b> [mm]	<b><math>L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}</math></b> [mH/km]
0,4	0,025
0,6	0,0365
<b>0,69</b>	<b>0,0414</b>
0,8	0,0473
1	0,0574

A táblázatban vastaggal jelölt  $d = 0,69$  mm átlagos távolságot véve  $L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} = 0,0414$  mH/km érték adódik. Ha ezt az értéket kivonjuk az összes mért eredményből, akkor az ábrán szürkével jelölt görbét kapjuk, mely jól illeszkedik az elemi vezetők módszerrel elméleti úton meghatározott induktivitás értékhez.

## 4.5.2 95 mm<sup>2</sup> AASC sodrony

### 4.5.2.1 Egyenáramú ellenállás

A mérés itt is a 4.2. fejezetben leírtak szerint történt az Elgar tápegységgel, illetve kézi multiméterekkel. Az egyenáramú ellenállást több, különböző nagyságú gerjesztéssel mérve a következő eredményeket kaptuk (4-3. táblázat).

4-3. táblázat: Egyenáramú ellenállás, hosszegységre eső ellenállás több gerjesztéssel mérve

I [A]	U [mV]	R [mΩ]	r [Ω/km]
5	4,97	0,994	0,315
5,9	5,85	1,009	0,314
6,8	6,74	1,009	0,314
7,92	7,85	1,009	0,314
8,82	8,73	1,01	0,313
9,95	9,85	1,01	0,313

A hosszegységre eső egyenáramú ellenállás átlaga 0,314 Ω/km.

Az eredményt kézi számítással is ellenőriztük, hasonlóan, mint a 25 mm<sup>2</sup> AASC sodronynál. A 95 mm<sup>2</sup> AASC sodrony már három rétegből áll: egy centrális szálból, mely teljesen egyenes. Hat elemi szál található a következő rétegben, mely a 25 mm<sup>2</sup>-es sodronyhoz hasonlóan rá van sodorva a belső vezetőszállra. A legkülső réteg tizenkét elemi szálat tartalmaz, mely szintén rá van sodorva az előző rétegre, azonban azzal ellentétes irányban. Az előbb ismertetett felépítés a 4.5-3. ábrán látható.



4.5-3. ábra: A 95 mm<sup>2</sup> AASC sodrony felépítése

Egy elemi szál átmérője tolómérővel mérve  $d = 2,5$  mm-nek adódott. Mivel az egyes elemi szálak itt is különböző utat tesznek meg, ezért a számítást három részre kell bontani.

A belső elemi szál egyenáramú ellenállása a következőképpen számítható a vizsgált vezető hosszának, valamint keresztmetszetének ismeretében:

$$R_{belső} = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} = 17,683 \text{ m}\Omega$$

A külső elemi szálak esetében itt is figyelembe kell venni a vezetők menetemelkedését. Annak érdekében, hogy a 6 elemi szál tartalmazó réteg menetemelkedését is megtudjam, egy kisebb darab sodronydarabról lebontottam a külső réteget. Itt a menetemelkedés 11 cm-nek adódott. Ezen réteg egy külső elemi szálának az ellenállása – figyelembe véve a menetemelkedésből adódó hossznövekedést – a következőképpen számítható:

$$R_{külső1} = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} + \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{l_{m1}} \cdot \frac{2r_k \pi}{A} = 20,208 \text{ m}\Omega$$

, ahol:

$r_k$  : közepes sugár = 2,5 mm

$l_{m1}$  : a második rétegbeli szál menetemelkedése = 11 cm

A kívül lévő elemi szál a belső szálhoz képest 4-szeres közepes sugárnyi távolságra található, így itt még nagyobb távolságot járnak be az elemi szálak a 3,1 m-es hosszban. A menetemelkedés itt 16 cm-nek adódott. A külső réteg egy elemi szálának ellenállása – figyelembe véve a menetemelkedésből adódó hossznövekedést – a következőképpen számítható:

$$R_{külső2} = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} + \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{l_{m2}} \cdot \frac{4r_k \pi}{A} = 21,155 \text{ m}\Omega$$

, ahol:

$l_{m2}$  : külső szál menetemelkedése = 16 cm

A vizsgált sodrony eredő ellenállása számítható, ha egy belső, hat második rétegbeli és tizenkét külső elemi szál párhuzamosan kapcsolunk. A bonyolult „repluszolást” elkerülve itt is célszerű admittanciát számolni, mivel így a párhuzamos kapcsolás eredő admittanciája az egyedi admittanciák összegeként adódik:

$$Y_{eredő} = \frac{1}{R_{eredő}} = \frac{1}{R_{belső}} + 6 \cdot \frac{1}{R_{külső1}} + 12 \cdot \frac{1}{R_{külső2}} \rightarrow R_{eredő} = 1,08 \text{ m}\Omega$$

Ebből a hosszegységre eső ellenállás:

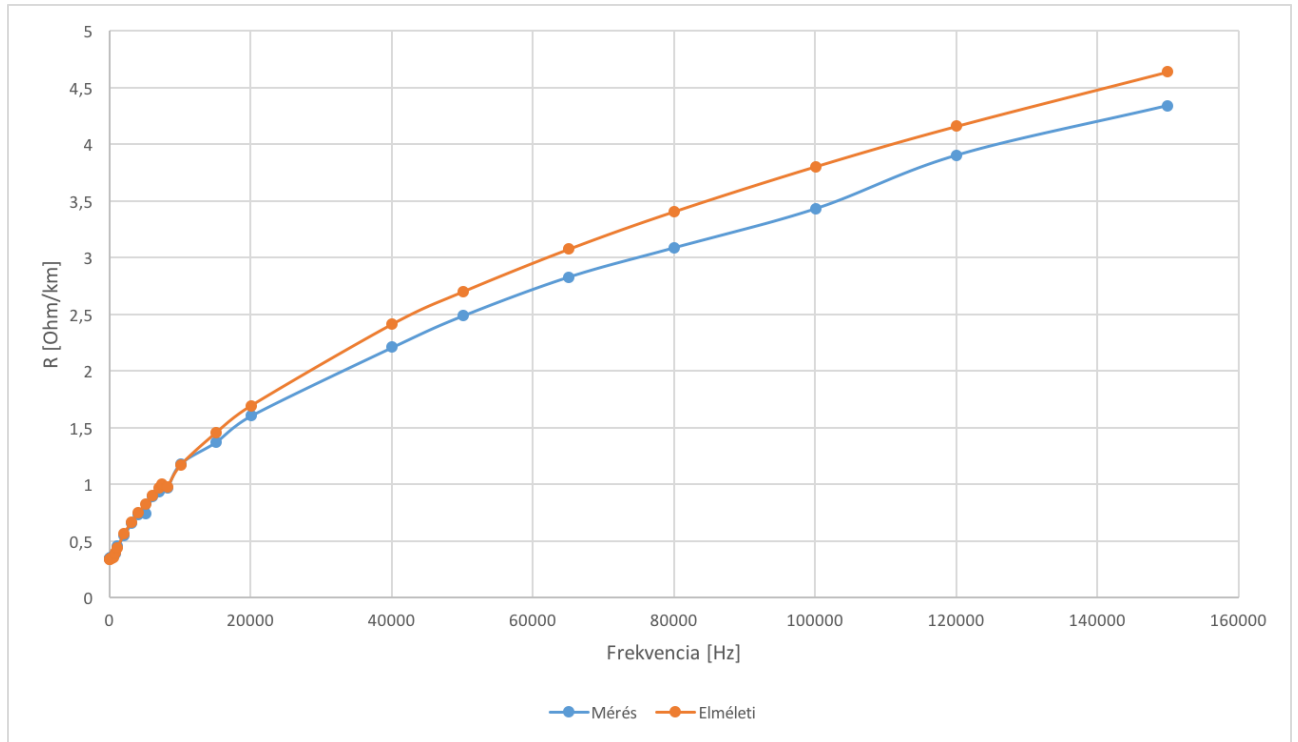
$$r_{95,AASC} = \frac{R_{eredő} [\text{m}\Omega]}{l [\text{m}]} = 0,348 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Látható, hogy a mért, illetve elméletileg számított eredmények kis hibával egyeznek. Érdekes azonban megjegyezni, hogy gyártás során az elemi szálakat összepréselik, így azok nem teljesen kör keresztmetszetűek. Ez a számítás pontosságát lényegesen befolyásolja.

#### 4.5.2.2 Váltakozóáramú felületi impedancia

A mérés a 4.2. fejezetben leírtak szerint történt 40 Hz és 150 kHz között, diszkrét frekvenciákon.

Az ellenállás mérés eredményei a 4.5-4. ábrán láthatók.

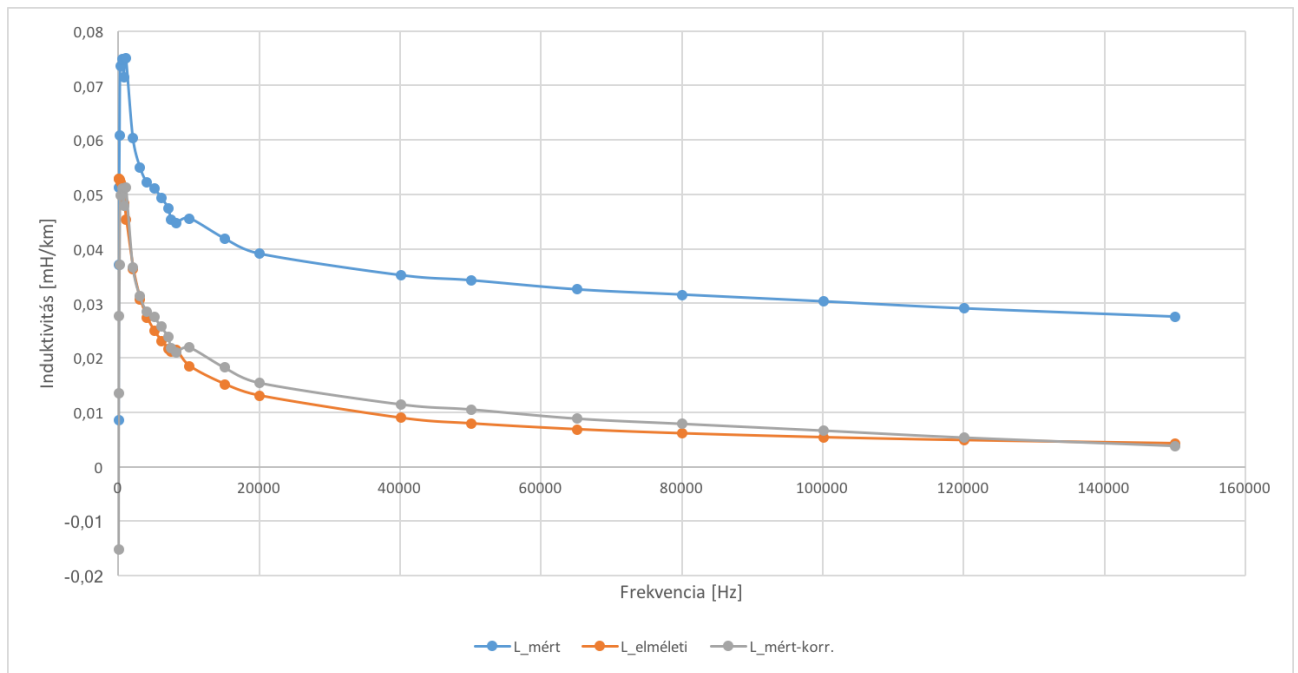


4.5-4. ábra: A 95mm<sup>2</sup> AASC sodrony ellenállása

Látható, hogy DC-hez közeli értékeken a mért érték megegyezik az előző fejezetben mért eredményekkel, még nagyobb frekvenciákon az áramkiszorítás jelensége miatt az ellenállás nő.

Az öninduktivitás mérés eredményei a 4.5-5. ábrán kék színnel láthatók, még az elemi vezetők módszerével számított elméleti érték a narancssárga színű görbe.





4.5-5. ábra: A 95mm<sup>2</sup> AAS sodrony öninduktivitása

Mint az előző sodrony esetén, úgy itt is látható, hogy az elemi vezetős módszerrel számított, valamint az általunk mért inductivitas görbéjének jellege hasonló, viszont egy konstans eltérés van köztük. Ezen jelenség okának leírása az 4.5.1.2. fejezetben található. A méréshez itt is ugyanazt a felületi vezetőt használtuk, mint az előző esetben. A járulékosan mért külső inductivitas értéke a következőképp számítható a 95 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű, 12,5 mm névleges külső átmérőjű AAS sodrony esetén:

$$L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} = 0,2 \cdot \ln\left(\frac{6,25 + d}{6,25}\right)$$

, ahol

$L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$  a járulékos külső inductivitas értéke

$d$  a sodrony felületének és felületi vezetőknek az egyenértékű távolsága

Érzékeltetésképp pár érték a fenti inductivitas néhány esetére a 4-4. táblázatban látható.

4-2. táblázat: Járulékos külső inductivitas értéke különböző felületi vezető - sodrony távolságokra

$d$ [mm]	$L_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$ [mH/km]
0,4	0,0124
0,6	0,0183
<b>0,7</b>	<b>0,0212</b>
0,8	0,0241
1	0,0297

---

6,25 mm névleges sugarú sodronynál, valamint 0,7 mm átlagos sodrony-felületi vezető távolságot feltételezve a járulékos induktivitás értéke 0,0212 mH/km-nek adódna. Ha ezt az értéket az összes mért értékből kivonjuk, akkor a szürke görbét kapjuk, mely jól illeszkedik az elméleti úton meghatározotthoz.

#### 4.6 Eredmények értékelése

Látható, hogy mind a 25 mm<sup>2</sup>, mind a 95 mm<sup>2</sup> keresztmetszetű AASC sodrony esetén a mért, illetve a szimulációval előállított eredmények jól egyeznek. Valószínűsíthető tehát, hogy a mérés és a szimuláció megfelelő.

Másrészt ezzel bizonyítottuk, hogy az elméleti vezetős módszerrel végzett szimuláció alkalmas lehet sodronyok ellenállásának és öninduktívitásának meghatározására ebben a frekvencia tartományban. Ez egy új eredmény, sem hazai, sem nemzetközi szakirodalomban ehhez hasonló nem található.

---

## 5 Közép/kisfeszültségű transzformátor frekvenciafüggő átviteli jellemzői

---

Ahogy a kisfeszültségen tipikusan használt sodronyok, úgy a közép/kisfeszültségű transzformátorok is közel vannak az interferencia jelenségek helyéhez, így ezek átviteli jellemzőit is érdemes lehet vizsgálni. A szakirodalomban nagyon sok mérés található, ahol különböző célú transzformátorok (pl. feszültségváltó, energiaátviteli, stb.) átvitelét vizsgálják, ezek azonban önmagában nem adnak helyes képet az üzemben lévő energiaátviteli transzformátorokra nézve.

A drezdai egyetemen [23] megvizsgálták egy 20/0,4 kV/kV névleges feszültségű, Dy<sub>0</sub>5 kapcsolási csoportú transzformátor átviteli jellemzőit. A mérés különlegessége, hogy a transzformátort üzemi viszonyok között vizsgálták, azaz a kisfeszültségű oldalról 0,4 kV névleges, 50 Hz-es feszültséggel gerjesztették. A zavarjelet szimuláló nagyfrekvenciás jelet erre szuperponálták. A vizsgálatot többféleképpen is elvégezték annak érdekében, hogy a transzformátor üzeme során előálló lehetséges eseményeket szimulálják: változtatták a feszültséget a névlegeshez képest +/- 10%-os tartományban, a zavaró jel értékét +/- 10%-os tartományban, illetve zérus sorrendű feszültséggel is táplálták. A vizsgálati elrendezést, illetve az azonos fázisok közötti átvitelt kivéve a többi mérés részletes eredményét itt nem ismertetjük, csupán a konklúziókat.

Az azonos fázisok közti átviteli tényező meghatározásához szükséges az átviteli tényező definiálása. Ezt a következőképpen tették meg:

$$n_{r,L_i}(f) = \frac{U_{out}(f)/U_{in}(f)}{(U_{out}/U_{in})_{rated}}$$

, ahol:

$n_{r,L_i}(f)$  a transzformátor i. fázisai közti átvitel az adott frekvencián

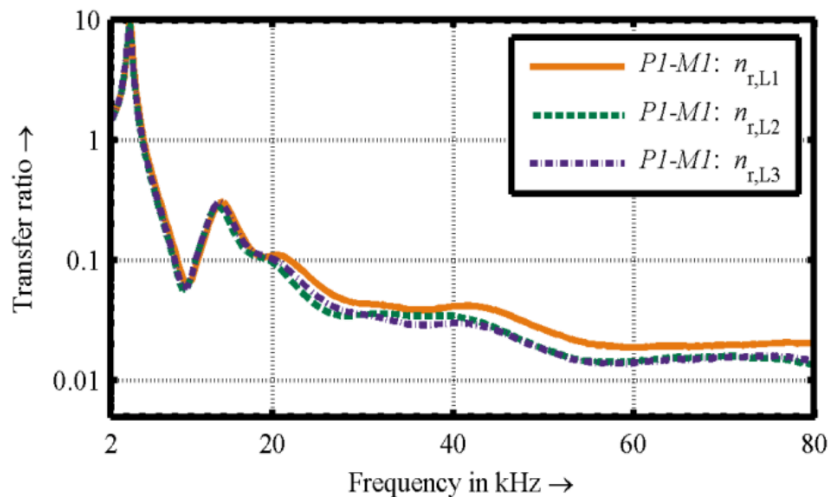
$U_{out}(f)$  a szekunder oldalon létrejövő zavarfeszültség

$U_{in}(f)$  a primer oldalra kapcsolt zavarfeszültség

$(U_{out}/U_{in})_{rated}$  a transzformátor névleges feszültségátvétele

A fenti összefüggés mindig az azonos oszlopon lévő fázisok között értelmezendő.

Megfelelő előmágnesezés mellett a mérési eredmények az alábbiak lettek (5-1. ábra).



5-1. ábra: A vizsgált transzformátor frekvenciafüggő átvitele a 2-80 kHz frekvencia tartományban

A vizsgálat főbb konklúziói a következők lettek:

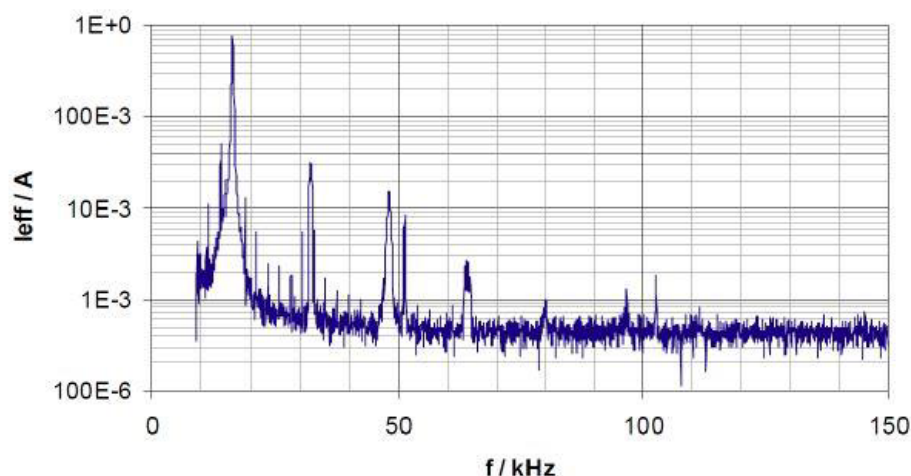
- Mint az 5-1. ábrán is látható, a mérési tartományban (2 – 80 kHz) a transzformátornak három rezonancia frekvenciája is van, ahol az átvitel ugrásszerűen megnő: 4,2 kHz, 14,5 kHz, illetve 19,5 kHz-en
- Az egyes fázisok átviteli tényezői kicsit eltérhetnek egymástól, amint az az 5-1. ábrán is látszik. Ennek oka, hogy az egyes oszlopok geometriái nem egyeznek pontosan.
- A transzformátor frekvenciafüggő átvitele a névleges feszültség körüli kis változásokra, illetve a zavar amplitúdójának kis változására érzéketlen
- Az átviteli jellemzők megfelelő előmágnesezettség nélkül megváltoznak, a rezonancia frekvenciák eltolódnak. Egyszerű, diagnosztikai célú átviteli jellemző vizsgálatokkal az üzemi átviteli jellemzők tehát nem mérhetők.

---

## 6 Vezetett zavar vizsgálat naperőmű hálózatán

---

Összhangban az Európai Unió Irányelveivel hazai szinten is egyre több napelemes kiserőművet, valamint háztartási méretű kiserőműveket létesítenek, nagymértékben támogatva a megújuló energiaforrásokra alapozott termelést, és az energiatermelésben résztvevő megújuló részarányának növelését. A napelemek által megtermelt egyenáramot az inverterek váltó irányítják, ezáltal felhasználható villamos energiát előállítva a váltakozó áramú elektronikus berendezéseink számára. A teljesítmény hatékony átalakításához az inverterek félvezető eszközöket használnak, amely impulzus szélesség moduláció (ISZM) segítségével állítja elő a kimenet oldali 50 Hz-es váltakozó feszültséget. Az ilyen átalakítók egyik mellékhatása olyan felharmonikusokban jelentkezik, amelyek frekvenciája, függően az alkalmazott félvezető gyorsaságától, igen széleskörű lehet. A leggyakrabban alkalmazott félvezető elemek az IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) vagy MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) tranzisztorok. Ezen félvezetők kapcsolási frekvenciája 16-30 kHz közé esik. A gyors kapcsolgatás következménye, hogy a kapcsolási frekvencián és azok többszörösein nem kívánatos felharmonikus áramok folynak a hálózatba. Ezért minden inverter AC oldali kimenetén EMC szűrők hivatottak csökkenteni ezen berendezések zavarkibocsátását [25].



6-1. ábra: PV inverter spektruma (1 A harmonikus áram 16 kHz környékén, a kapcsolási frekvencián)

Az inverterek nagyfrekvenciás zavarkibocsátásának vizsgálatához, a Sellyén található napelem parkban végeztünk méréseket.

### 6.1 Sellyei napelem-park

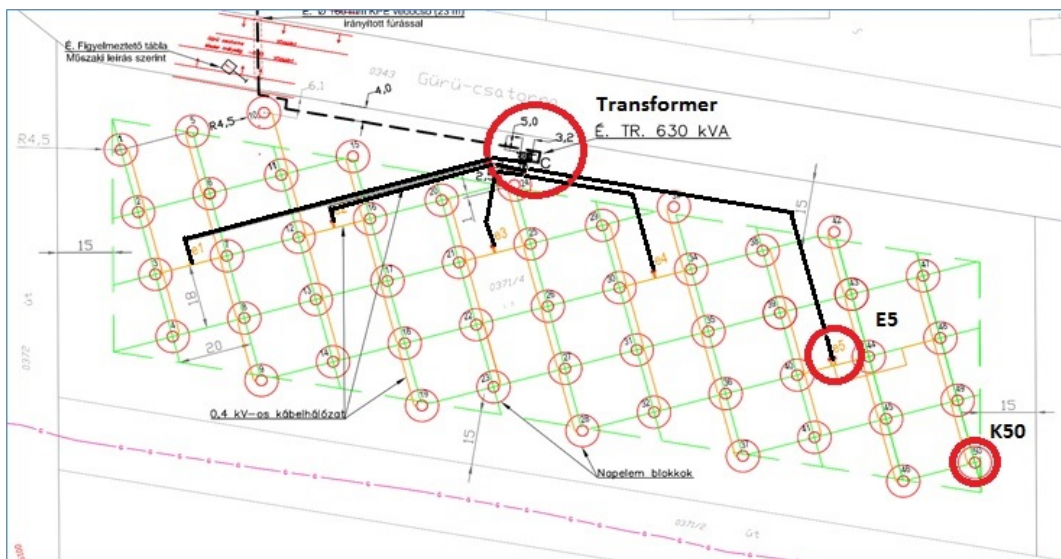
Sellye Baranya megyében található kisváros, melynek határában 2013-ban épült egy közel 500 kW beépített teljesítményű napelem park. A napelemek a 20 kV-os hálózatra táplálódnak és szolgáltatják a villamos energiát a környéken élők számára.

A parkban ötven egység található, amelyek egyenként 42 panelt tartalmaznak. Minden egység 10 kW teljesítményű, napkövető rendszerrel ellátott és külön inverterrel rendelkezik. Egy ilyen egység látható a 6.1-1. ábrán.



**6.1-1. ábra: Egy egység 42 db panel napkövető mechanikával és inverterrel**

Az inverterek 2 – 150 kHz tartománybeli zavarkibocsátását három helyen vizsgáltuk. A cél az volt, hogy először megmérjük egy egység (egy inverter) zavarkibocsátását, utána 10 egységét, majd végül az egész napelem parkét, hogy képet kaphassunk a zavarjelek nagyságáról valamint esetleges összegződéséről. A mérési pontokat a 6.1-2. ábra pirossal jelölt részei mutatják.



**6.1-2. ábra: Helyszínrajz**

Minden egység mellett egy kapcsolószekrény helyezkedik el, amelyek számozása K1-től K50-ig tart. Az egyes kapcsolószekrényektől, a panelek által termelt villamos energia 3 fázisú kábeleken keresztül érkezik

---

az elosztószekrényekbe – amelyek számozása E1-től E5-ig tart – és végül a 20/0,4 kV áttételű 630 kVA névleges teljesítményű transzformátoron keresztül jut a 20 kV-os elosztóhálózatra.

## 6.2 Alkalmazott mérés technika

### 6.2.1 Feszültség-mérés

A feszültség mérésére a svéd Swemet cég által gyártott MFA 600 multifunkcionális adatrögzítő berendezést használtuk, amely lényegében egy spektrum analízátor, és kifejezetten a 2-150 kHz sáv frekvenciatartományának vizsgálatára lett kifejlesztve. A mérési adatok szoftver segítségével spektogrammá alakíthatók, így a zavarok időtartománybeli viselkedése is nyomon követhető. A mérőműszerről kép a 6.2-1. ábrán látható.



6.2-1. ábra: MFA 600 3 fázisú spektrum analízátor

### 6.2.2 Áram-mérés

A 2 – 150 kHz tartományban jelentkező áramharmonikusok vizsgálatához a következő eszközöket használtuk fel:

- Dell XFR E6400: ez egy katonai kivitelű számítógép, mely egy beépített Aaron spektrumanalízátorral rendelkezik
- ETS-LINDGREN 91550-1L árammérő lakatfogó: speciális lakatfogó, kifejezetten nagyfrekvenciás jelek vizsgálatára (10 kHz – 100 MHz). Maximum 350 A primer áram mérhető vele.
- Külső csillapító: mivel a spektrumanalízátor nagyon kis bemeneti jelszinttel rendelkezik (legfeljebb 5 mV<sub>p</sub> feszültség kapcsolható rá), ezért külső csillapítóra is szükségünk volt. Erre a célra egy 20 dB-es nagyfrekvenciás csillapító éppen megfelelt
- CA-MA200 MiniFlex lakatfogó: az egy inverter modul által betáplált áramokat egy miniflex lakatfogóval mértük, különösen a napelem modulok kiforgatása során.

Az eszközök a 6.2-2. ábrán láthatók.



6.2-2. ábra: Az áramméréshez felhasznált eszközök

Az eredményeket az MCS ingyenesen letölthető spektrumanalizátor szoftverével lehet kiértékelni, illetve műszer paramétereit állítani (pl. sávszélesség). Megjegyzendő, hogy a szoftver csak csúcserőértékeket tud ábrázolni, így az effektív érték számításokat manuálisan végeztük. A mérés során a következő paramétereket választottuk:

- Frekvenciatartomány: 2 – 150 kHz
- Sávszélesség: 300 Hz
- Mintavételi idő: 200 ms

A mért feszültség, valamint lakatfogó transzfer impedanciájának – mely frekvenciafüggő – ismeretében az áramok számíthatók.

## 6.3 Vizsgálati eredmények

### 6.3.1 K50 kapcsolószekrény

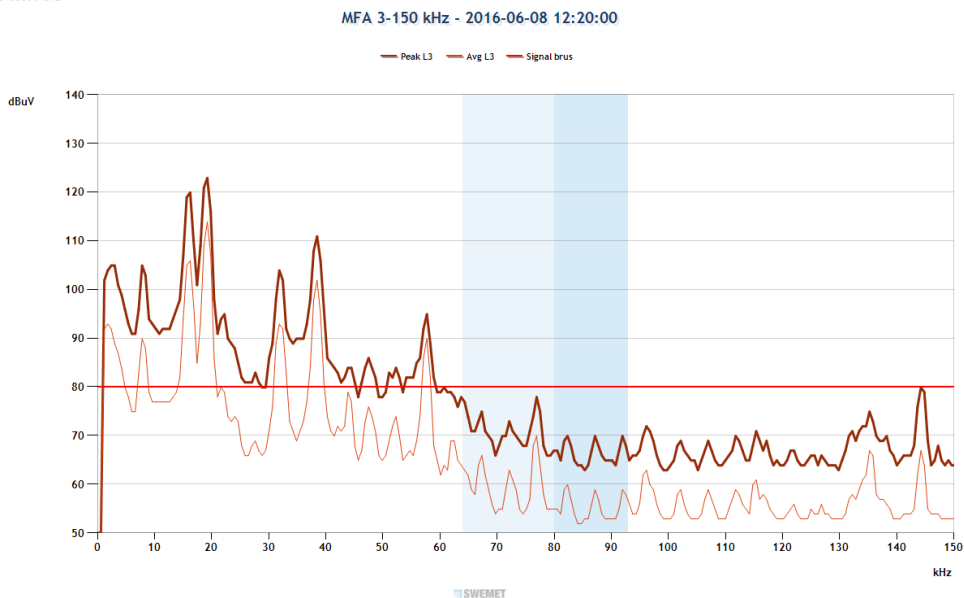
Az első mérés a transzformátortól legtávolabbi egység K50 jelű kapcsolószekrényében történt. A 6.3-1. ábrán láthatóak a zavarfeszültség csúcs és öt perces átlagértékei a frekvencia függvényében, a háromfázisú inverter egyik fázisára vonatkozólag. A feszültségkomponensek közül a 16 kHz és 19 kHz, valamint ezek többszörösei dominálnak. A 16 kHz komponens csúcserőértéke 120 dB $\mu$ V, míg 32 kHz-en ez 100 dB $\mu$ V körüli. A 19 kHz komponens csúcserőértéke a legnagyobb, és a frekvencia növekedésével többszörösei csökkenő értékűek.

A mérés idején a panel 12 A áramot (effektív érték) injektált a hálózatba, mely 8,3 kW teljesítménynek felel meg. Több mérés eredményeként elmondható, hogy a 16 kHz-es áramkomponens értéke 24,5 és 33,5 mA között mozog. Ezek közül egy a 6.3-2. ábrán látható.

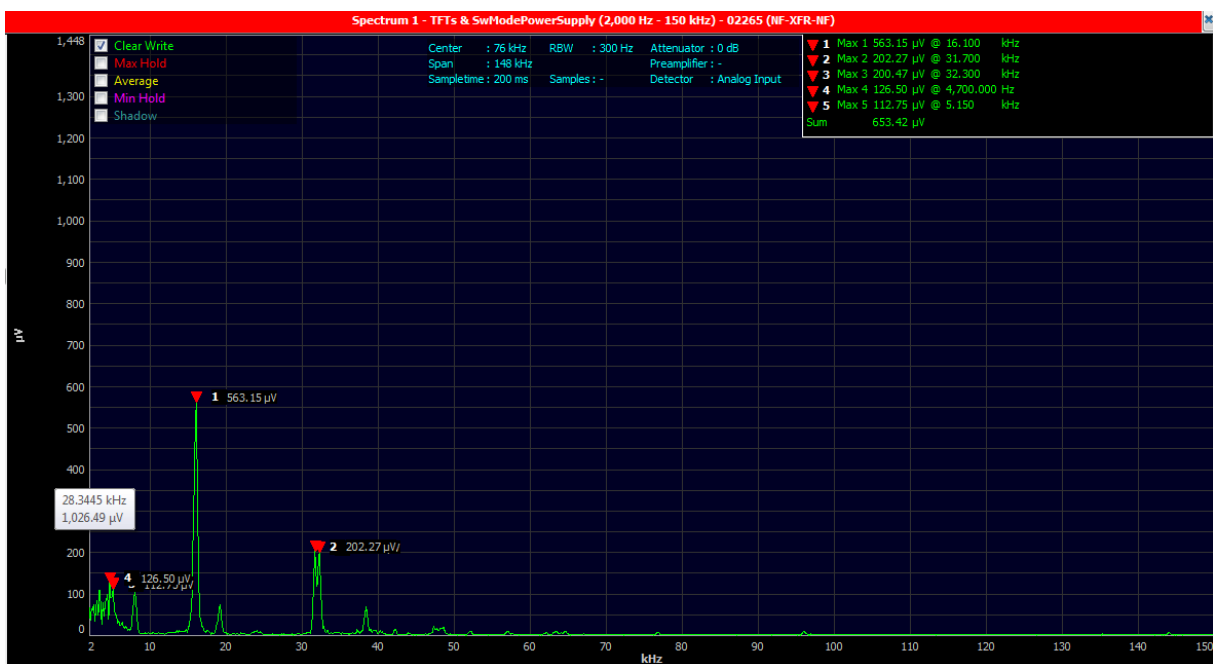
Ezek után kíváncsiak voltunk, a kibocsátott zavar hogyan változik az aktuális teljesítménnyel. A napelemeket kézi vezérlésre kapcsolva kiforgattuk azokat egy kevésbé hatékony pozícióba. A betáplált áram ekkor 7,1 A volt, mely a kezdeti érték 60%-a. Ismét több mérés eredményeként a 16 kHz-es áramok értéke 19 és 34 mA közé adódott. Mint az látható, a felharmonikus áram mértéke tehát nem változott a betáplált árammal.



735999254050004372



6.3-1. ábra: Feszültségspektrum a 2-150 kHz sávban a K50 kapcsolószekrényénél



6.3-2. ábra: Áramspektrum a 2-150 kHz sávban a K50 kapcsolószekrényénél

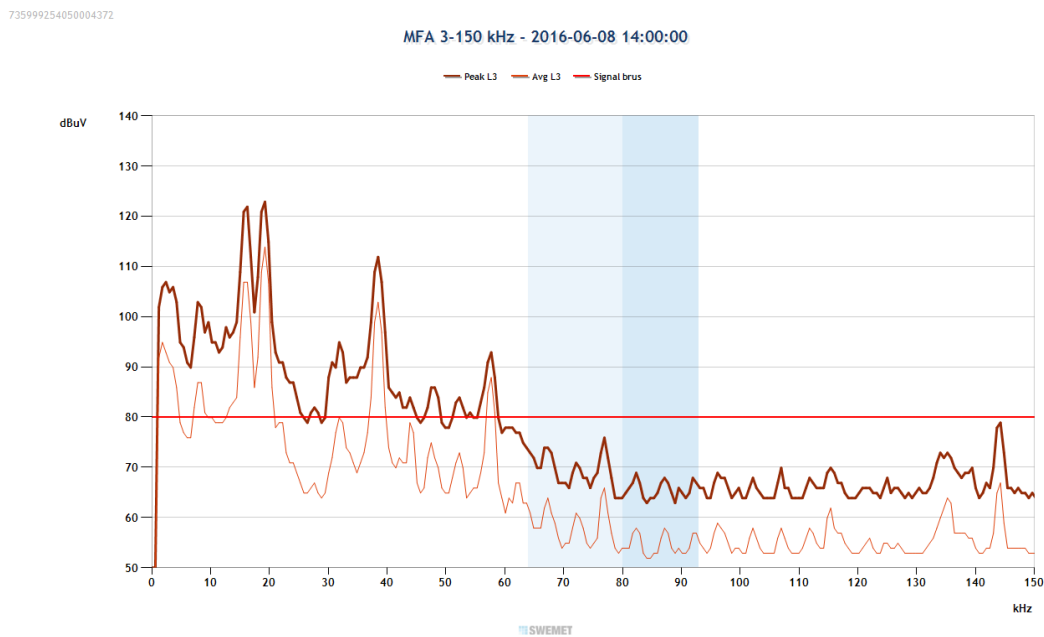
### 6.3.2 E5 Elosztószekrény

Ezután az E5-ös számú elosztószekrényt mértük le, melynek feladata tíz napelem modul által betáplált áram összegyűjtése. Itt lehetőségünk adódott a tíz modul által egyedileg betáplált áramok mérésére, illetve az eredő áraméra is, mely az elosztószekrénytől a transzformátorig már egy kábelben folyik.

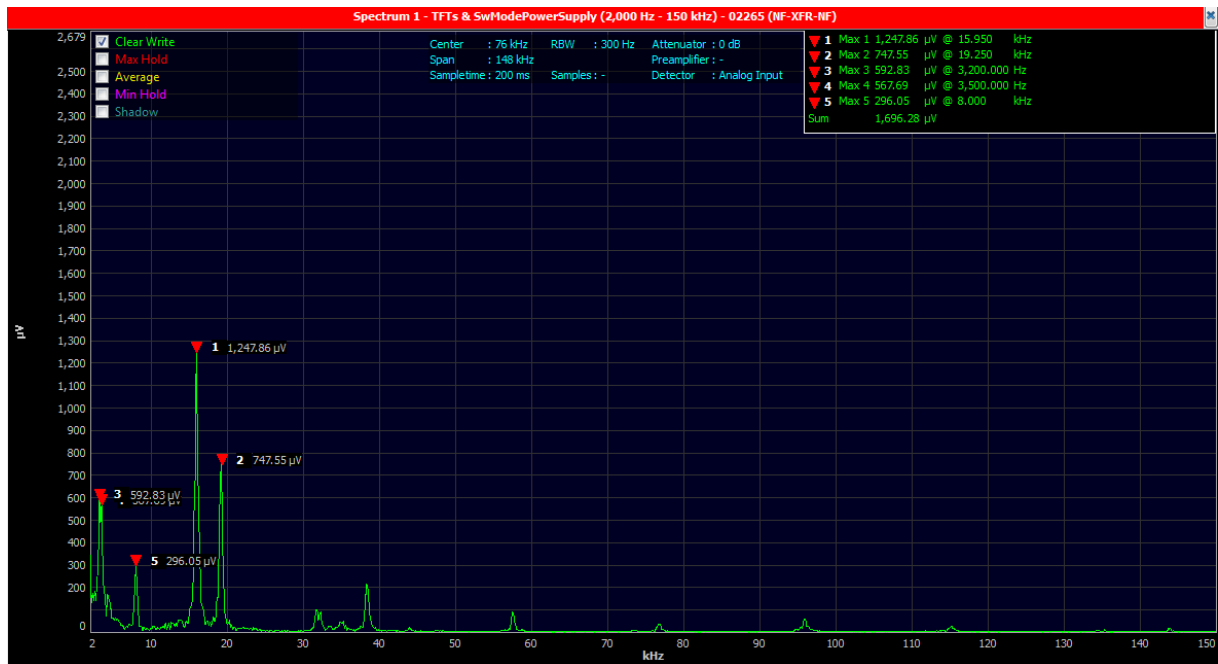
A feszültségmérés spektruma a 6.3-3. ábrán látható. A csúcs és az átlagértékek is szinte azonosak az előző mérés eredményeivel, kivéve a 32 kHz komponenst, ahol is a zavarjel kicsivel több mint 10 dB-t csillapodott.

Itt az eredő áramot is vizsgáltuk, melynek spektruma a 6.3-4. ábrán látható. Az előzőekben is látott 16 kHz-es komponens ismét nagynak adódott: 25 és 47 mA közötti értéket mértünk. A 19 kHz-es összetevő itt szintén szignifikáns volt. Értéke 21-23 mA-nek adódott.

Ezek után a tíz modul egyedi áramát néztük meg. Mindegyik áramkört mértük, mely az E5-ös elosztó szekrénybe csatlakozik. A mért értékek elég nagy szórást mutattak: a 16 kHz-es komponens 25 és 47 mA között mozgott, még a 32 kHz-es 4,5 és 9,5 mA között. A 19 kHz-es összetevő minden leágazásban 3 mA alatt volt. Egyéb frekvenciákon nem volt jelentős zavarkibocsátás.



6.3-3. ábra: Feszültségmérés spektruma a 2-150 kHz sávban az E5 elosztószekrényénél



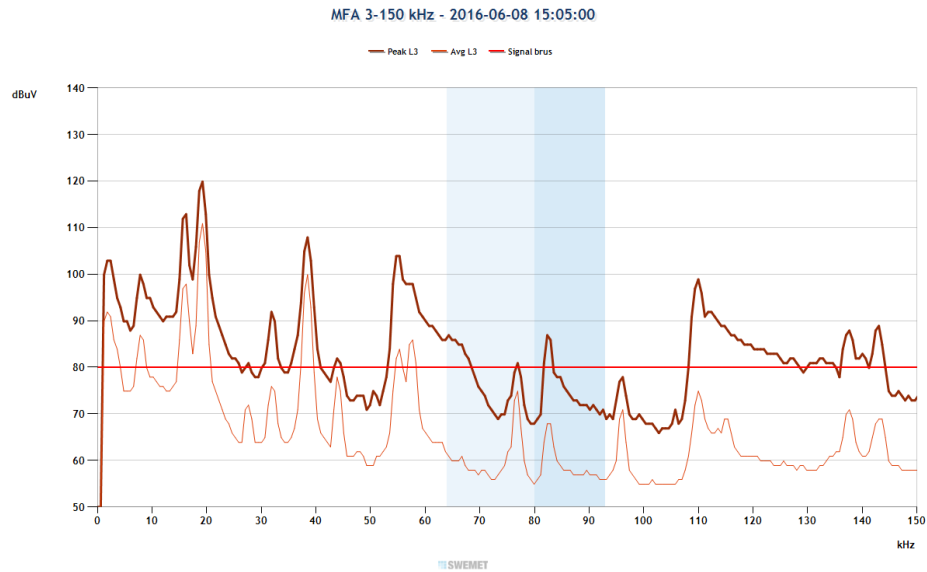
6.3-4. ábra: Áramspektrum a 2-150 kHz sávban az E5 elosztószekrényénél

### 6.3.3 Transzformátor

A transzformátornál árammérést nem tudtunk végrehajtani, melynek három oka is volt:

- az általunk használt nagyobb lakatfogók mérési határa 350 A, azonban a mérendő áramérték az előző eredmények alapján kb. 500-550 A körül lett volna
- a sínzésre csatlakozást csak teljes feszültségmentesítéssel lehetett volna megoldani, ami a teljes napelempark kiesését okozta volna legalább kétszer fél órára
- a lakatfogó átmérője kisebb volt, mint a sín szélessége.

Itt tehát áramértékek nem állnak rendelkezésre. A feszültséget a transzformátorban elhelyezett háromfázisú dugaszoló aljzataból vettük le. Itt a 16 kHz komponens csúcsértéke 8-10 dB-lel kisebb, mint az előző két mérés esetén. A 19 kHz-es komponens nagysága alig változott. A feszültségmérés eredménye a 6.3-5. ábrán látható.



6.3-5. ábra: Feszültség spektrum a 2-150 kHz sávban a 20/0,4 kV-os transzformátornál

<b>Power:</b>	1679 W
<b>Daily yield:</b>	4359.32 kWh
<b>Total yield:</b>	2526.96 MWh

6.3-6. ábra: A mérés napján, a panelek által termelt energia

## 6.4 Konklúzió

A fenti mérések alapján a következő konklúziókat vonhatjuk le:

- A különböző harmonikusok összegződése valószínűleg egy sztochasztikus folyamat, mely nem írható le egy egyszerű, konkrét, jól alkalmazható matematikai formulával
  - A 16 kHz-es áramkomponens értéke 10 modulra nézve ugyanakkora volt, mint az egyes leágazások egyedi 16 kHz-es összetevője
  - A 19 kHz-es eredő (10 db modul) áramkomponens értéke 5-10-szer nagyobb volt, mint az egyes leágazások egyedi 19 kHz-es összetevője
- A kapcsolási frekvencián kibocsátott áramok mértéke nem változik lényegesen a betáplált teljesítménnyel. Változás csak az inverterek kikapcsolt állapotában észlelhető.
- Csillapodásra vonatkozó következményeket nem tudunk megfogalmazni, mivel ennek méréséhez nem állt rendelkezésre megfelelő műszerpark.
- A várakozásainkkal ellentétben a napelem park nagyfrekvenciás zavarkibocsátása jóval az IEC 61000-4-19 szabványban meghatározott vizsgálati szintek alatt maradt.

---

## 7 Elektronikus fogyasztásmérők szabványos zavartűrési vizsgálata

---

A hagyományos Ferraris elvű fogyasztásmérőket világszerte folyamatosan váltják fel az elektronikus mérők. Ez a folyamat hazánkban is megfigyelhető, mivel az elosztó hálózati engedélyesek 2011. év elejétől csak elektronikus felépítésű mérőket szerelnek fel a hálózatra. Az elektronikus mérők legújabb generációját a kommunikációs készüléggel rendelkező okos mérők, vagy más néven smart mérők képviselik. Ezek a mérők vezetékes vagy vezeték nélküli kapcsolat segítségével nyújtanak valós idejű információkat a felhasználó és szolgáltató számára egyaránt. A harmadik energiacsomag [26] konkrét megfogalmazásokat is tesz az okos mérés bevezethetőségéről, vagyis *„amennyiben az intelligens mérőberendezések üzembe helyezéséről kedvező értékelés születik, 2020-ig legalább a fogyasztók 80 %-át el kell látni intelligens mérési rendszerrel.”* Ha csak az Európában távleolvasott fogyasztásmérőket vesszük figyelembe, akkor azt mondhatjuk, hogy körülbelül 50 millió telepített okos mérő üzemel, amely adat nem tartalmazza a kommunikációs készüléggel nem rendelkező elektronikus mérőket. Ezek alapján tehát látható, hogy az egyik legnagyobb számban érintett zavarálózatokról beszélünk, és a telepített végpontok száma egyre nő. A villamos fogyasztásmérők zavarérzékenységének problémájával elsősorban olyan országok szembesültek, ahol az automatikus fogyasztásmérő leolvasó rendszereket teljes mértékben kiépítették.

### 7.1 Elektronikus fogyasztásmérők zavarérzékenysége

#### 7.1.1 SWEDAC

Svédországban egy 2009-es kormányrendeletnek köszönhetően - mely a villamos fogyasztásmérők távleolvashatóságát irányozta elő - körülbelül 5 millió villamos fogyasztásmérőt cseréltek le okos, kétirányú kommunikációt biztosító fogyasztásmérőkre. Ezzel közel 100%-os kiépítettséggel valósult meg automatikus távleolvasást támogató rendszer [27]. A telepített mérők közül az egyik típus (500.000 darab) jelentősen érzékenynek bizonyult a 2-150 kHz-es frekvenciatartományban jelentkező vezetett zavarokra. Ezt követően a SWEDAC (Swedish Board for Accreditation and Conformity Assessment) 2010 novemberében formális ellenvetést nyújtott be az Európai Bizottság titkárságára azzal az indokkal, hogy az EN-50470 Európai szabvány 1-es [28] és 3-as [29] részeinek bizonyos fejezetei - nevezetesen a 7.4 (Elektromágneses kompatibilitás), 8.5 (Hosszú időtartamú zavarok hatásai) és a 8.7 (Vizsgálatok végrehajtása) - nem tartalmaznak megfelelő zavartűrési követelményeket a 2-150 kHz-es frekvenciasávban a villamos fogyasztásmérőkre [30]. A SWEDAC felvetésére reagálva két meghatározó dokumentum is született, amely a villamos fogyasztásmérők zavartűrésének vizsgálatával foglalkozik. Az egyik a CLC TC/13 Műszaki Bizottsága által 2012-ben kiadott CLC/TR 50579:2012 [29] technológiai jelentés, amely már pótolja az EN 50470 szabvány SWEDAC által kifogásolt részeit. A másik az IEC SC 77A WG6 munkacsoport által 2014-ben publikált IEC 61000-4-19:2014 [7] zavartűrési vizsgálati szabvány, amely már nem csak fogyasztásmérőkre korlátozódik. Az ebben definiált vizsgálatok, vizsgálati szintek vonatkoznak minden olyan berendezésre,

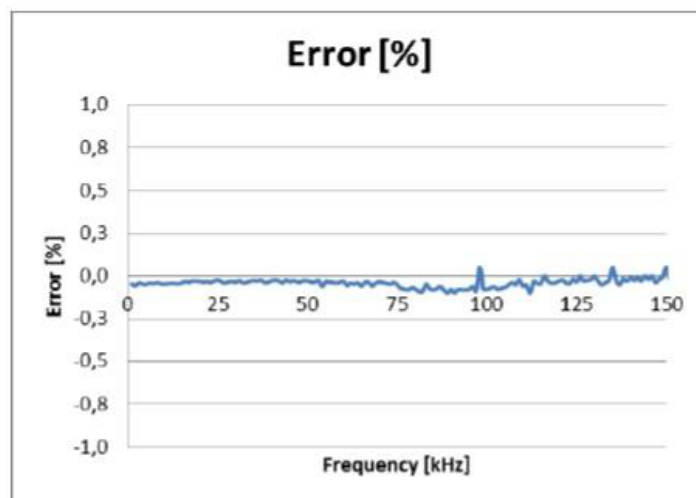
amelyek váltakozó áramú bemeneti kapukkal rendelkeznek. A villamos fogyasztásmérők vizsgálata külön mellékletben is szerepel a szabványban, mely jelentősen épít a CLC/TC 13 Műszaki Bizottság által kiadott technológiai jelentésre.

### 7.1.2 NMI vizsgáló intézet

2012-ben az NMI Holland Mérő és Minősítő intézet 72 fajta, különböző mérőt vizsgált meg különböző mérőgyártóktól. Az egyes fogyasztásmérők eltérő mérési technológiát használtak a gyártói specifikációk alapján. A vizsgált mérők között voltak

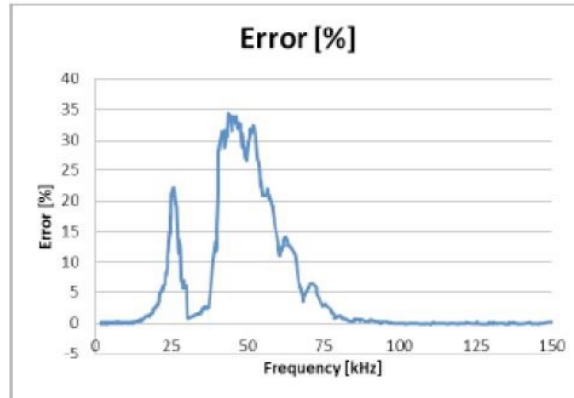
- Hall-effektusos
- söntös
- Rogowski tekercses
- belső transzformátoros

mérők is. A vizsgálati tapasztalatok azt mutatták, hogy a mérők jelentős része nem befolyásolható a 2-150 kHz frekvenciasávban terjedő vezetett zavarok által, mint ahogy azt a 7.1-1.-es ábra is mutatja. A hibák tized százalékos nagyságrendbe estek.



**7.1-1. ábra: Kis hiba a mérők jelentős részénél**

A vizsgált mérők 92%-nál a mérési hiba a gyártó által megadott pontossági osztályon belül maradt. Néhány mérő típusnál (6 darab, ami a vizsgált mérők 8 %) azonban jelentős nagyságú befolyásolhatóságot tapasztaltak (7.1-2. ábra). Ezek közt voltak direkt és közvetett csatlakozású mérők is. Mind a 6 mérő Rogowski tekercses mérési technológiát alkalmazott. A hiba egészen 15% és 100% közötti volt, de voltak olyan hibátlanul működő mérők is, amelyek szintén Rogowski tekercset használtak. A söntös, belső transzformátoros és Hall-effektusos mérési technológiát alkalmazó mérőknél semmilyen befolyásolhatóságot nem észleltek.



**7.1-2. ábra: Jelentős hiba néhány Rogowski tekercses mérőnél**

Az NMI Holland MÉRŐ és Minősítő intézet is megállapította azt a tényt, amire már korábban a SWEDAC is rámutatott, hogy az EN 50470-es szabvány hiányos, és nem tartalmazza a 2-150 kHz-es frekvenciasávban terjedő vezetett zavarok elleni védelmet. A vizsgálatokat az NMI a CLC/TC 13 Műszaki Bizottság által publikált műszaki jelentés alapján végezte, mely mintegy kiegészítésül szolgál az EN 50470 szabvány egyes és hármas részeihez. Az EN 50470 és a CLC/TR 50579 együttes használata már pótolja a SWEDAC által kifogásoltakat [32]. Ennek következtében a svéd intézet 2014-ben vissza is vonta az ellenvetést [33].

## 7.2 Zavartűrési vizsgálat

A BME Villamos Energetika Tanszék Smart Grid laboratóriumában kidolgozásra került egy zavartűrési vizsgálati módszer, amelynek alapját az IEC 61000-4-19:2014 szabvány képezi. A cél az volt, hogy hálózati terhelés alatt a mérők mennyire érzékenyek az 50 Hz-es jelre szuperponált zavaráramokra, más néven, hogy a relatív mérési hibák gyártói osztálypontosságán belül maradnak-e a nagyfrekvenciás zavaráram hatására. Három gyártó egy- és háromfázisú fogyasztásmérőit vizsgáltuk, amelyek közt voltak statikus elektronikus mérők, okos mérők, valamint háztartási kiserőműveknél használt úgynevezett ad-vesz mérők is. A mérési technológiát illetően a mérők vagy sönt ellenállást, vagy pedig Rogowski tekercset használtak áramérzékelés céljára.

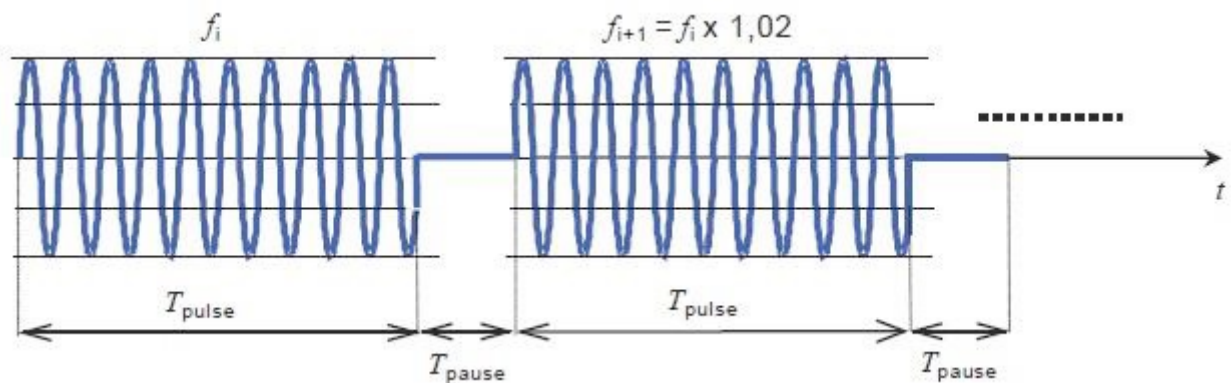
### 7.2.1 Vizsgálati jelalakok, szintek

A szabvány két különböző jelalkalakkal történő vizsgálatot ír elő mind feszültségre, mind pedig áramra vonatkozólag. A feszültségvizsgálat gyakorlatilag minden berendezés esetén alkalmazható, míg az áramvizsgálat csak olyan esetekben, amikor a vizsgált berendezés (EUT) váltakozó áramú kapuval rendelkezik, tipikusan mint a fogyasztásmérők. Ezzel összhangban a vizsgálatok során alkalmazott zavarjelek alatt zavaráramokat kell érteni.

A két vizsgálati jelalak

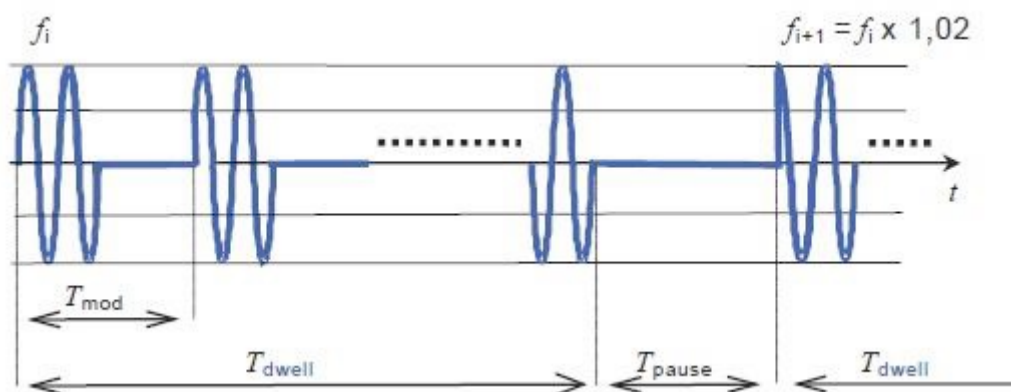
- Pásztázó vizsgálat, folytonos hullámformájú (szinuszos) impulzusokkal, az egyes impulzusok közti szünettel
- Vizsgálat négyyszögjellel modulált impulzusokkal, négy különböző modulációs frekvenciát alkalmazva

a hálózaton terjedő szimmetrikus (differenciális módusú) zavarok leképzése, amelyek különböző zavarforrásokból származhatnak.



7.2-1. ábra: A pásztázó vizsgálatához tartozó hullámforma

Az pásztázó vizsgálatához tartozó hullámforma hivatott leképzeni azokat a zavarjeleket, amelyek a hosszú idejű PLC kommunikáció által okozott elektromágneses zavarásra, valamint az áramátalakítók zavarkibocsátására jellemzőek. Az egyes impulzusok közti szünetek a zavaró berendezés ki-és bekapcsolásának hatását reprezentálják.



7.2-2. ábra: A négyyszögjellel modulált impulzusokkal történő vizsgálatához tartozó hullámforma

A négyyszögjellel modulált impulzusokkal történő vizsgálat jelalakja pedig azokat a zavarjeleket képezi le, amelyek burkológörbéje az idővel változik. A szabvány négy modulációs frekvenciát határoz meg külön az 50 Hz-es és külön a 60 Hz-es hálózatokra. Számunkra csak az 50 Hz-es releváns. A 3 Hz-es moduláció



segítségével képezhető le a PLC kommunikációra jellemző szándékos zavarkibocsátás. A 101 Hz, 301 Hz és a 601 Hz modulációk pedig az egy- és háromfázisú inverterek nem szándékolt zavarkibocsátásából eredő zavaró hatásokat modellezzik.

A szabványban 4 konkrét vizsgálati szint (7.2-1. táblázat) került meghatározásra, amelyek mindegyike egy-egy környezeti osztályba történő besorolást jelent annak megfelelően, hogy a vizsgált berendezést hol és milyen körülmények között alkalmazzák.

7.2-1. táblázat: Vizsgálati szintek

Vizsgálati szint	$I_{\text{eff}}$ [A] (2-30 kHz)	$I_{\text{eff}}$ [A] 30-150 kHz
1	1	0,5
2	2	1
3	3	1,5
4	4	2

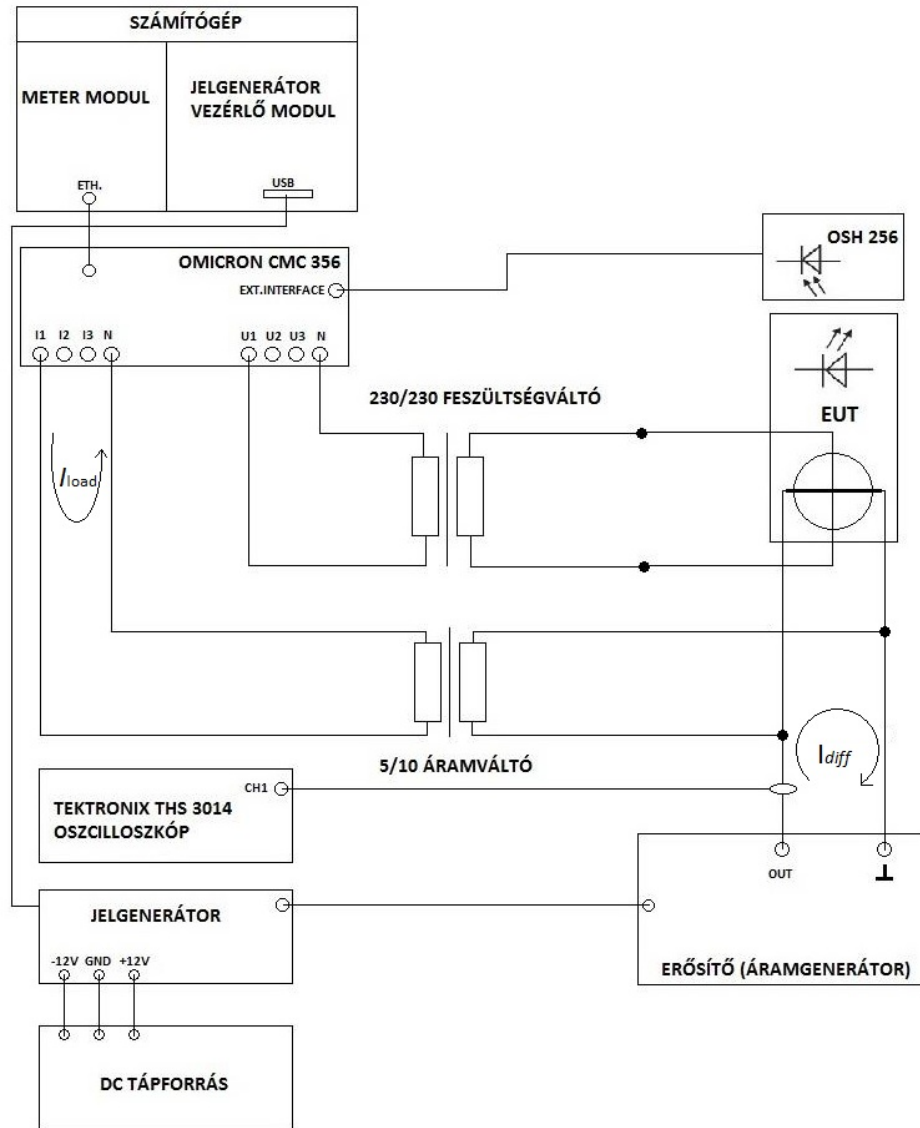
A táblázat alapján látható, hogy az egyes szintek közötti különbség a zavaróáram effektív értékéből adódik. A zavaróáram nagysága 30 kHz felett az eredeti érték felére csökken a vizsgálat közben.

A villamos fogyasztásmérőket az egyes és hármas környezeti szinteknek megfelelően vizsgáltuk. A hármas környezeti szint (Tipikus lakóhelyi, és enyhén ipari környezet), mint ahogy a neve is érzékelteti, azt a környezetet képezi le, amelyben a legtöbb telepített mérő üzemel. A szintre vonatkozó alapvető tulajdonságok [7]:

- Közvetlen csatlakozás a kiefeszültségű/középfeszültségű hálózatra.
- Az elektronikus berendezések földeltek
- Teljesítmény átalakítókból származó kóboráramok jelenléte a földelő hálózatban

### 7.2.2 Vizsgálati összeállítás

A vizsgálati módszer alapvető lényege, hogy tisztán szinuszos hálózati frekvenciás terhelő áramot ( $I_{\text{Load}}$ ) vezetünk a vizsgált berendezés áramkapujára - amely a mi esetünkben egy elektronikus mérő- és erre a jelre szuperponáljuk rá a 2-150kHz-es zavaró áramot ( $I_{\text{Diff}}$ ). Mindkét áramnak keresztül kell folynia a mérő áramtekercsén, amelyeket egymástól független módon kell előállítani. A zavaró áram előállításának módja nem specifikált, ami lényeges az csak a nagysága, amelyet az előző fejezetben ismertettek alapján lehet kiválasztani a környezeti osztályoknak megfelelően, valamint a jelalakja annak megfelelően, hogy milyen zavaró hatással szemben vizsgáljuk a mérőket.



7.2-3. ábra: Vizsgálati összeállítás

A hálózati frekvenciás terhelés előállításához egy Omicron CMC 356 vizsgálóberendezés feszültség és áramkimeneteit használtuk. A vizsgáló berendezés fontos tartozéka az optikai fej, melyet az elektronikus fogyasztásmérők szabványos metrológiai LED - jére helyezve visszaméri az elektronikus mérő által regisztrált villamos energiát. A kiadott fény impulzus arányos a mérő által mért villamos energia nagyságával, amelyek közti kapcsolatot a mérő-állandó fejezi ki. Az zavaráram hullámalakjának előállításához egy tanszéki gyártású, számítógép által vezérelhető jelgenerátort alkalmaztunk. A megfelelő áramnagyság eléréséhez, a szintén tanszéken gyártott erősítőt (áramgenerátort) használtunk, amely képes a jelet felerősíteni az 1-4 A áramtartományban. Az áramgenerátor jelét szuperponáltuk a hálózati frekvenciás terhelőáramra. Ahhoz, hogy az 50 Hz-es jelet előállító generátort, és a zavarjelet erősítő áramgenerátort párhuzamos kapcsolásban használjuk, szükséges a két berendezés föld független

---

galvanikus leválasztása, amelyet egy áramváltó, és egy elválasztó transzformátor segítségével valósítottuk meg.

### 7.2.3 A vizsgálat alapvető lépései

A vizsgálatoknak négy olyan pontja volt, amely a mérők relatív mérési hibájának megállapításához vezetett.

1. Az elektronikus mérők relatív mérési hibájának megállapítása direkt táplálás esetén. Ebben az esetben kizárólag a hálózati frekvenciás terhelést vezetünk a mérőre.
2. Az elektronikus mérők relatív mérési hibájának megállapítása, közvetett táplálás esetén áram-, és feszültségválasztón keresztül. Ebben az esetben is kizárólag a hálózati frekvenciás terhelést vezetve a mérő bemeneti kapujára.
3. Az elektronikus mérők relatív mérési hibájának megállapítása, közvetett táplálás esetén áram-, és feszültségválasztón keresztül, azonban a hálózati frekvenciás terhelés mellett a 2-150 kHz zavaróáramot is rávezetjük a mérő bemeneti kapujára.
4. A 3. pontban meghatározott relatív mérési hiba korrekciója szükséges, a mérés során jelenlévő rendszeres hibából, és leválasztásból fakadóan. Az eredmények kiértékelése.

A vizsgálat során jelentkező rendszeres hiba a fogyasztásmérő áramtekercsének és a zavarjelet erősítő generátornak a párhuzamos kapcsolása miatt adódik. Ilyen elrendezésben az 50 Hz-es áram egy része nem a fogyasztásmérő áramtekercsén, hanem az erősítő kimeneti ellenállásán záródik. A két ellenállás ismeretében a hiba az alábbi képlettel számítható.

$$h_{rendszeres} [\%] = - \frac{Z_{mérő}}{Z_{mérő} + Z_{erősítő}} * 100$$

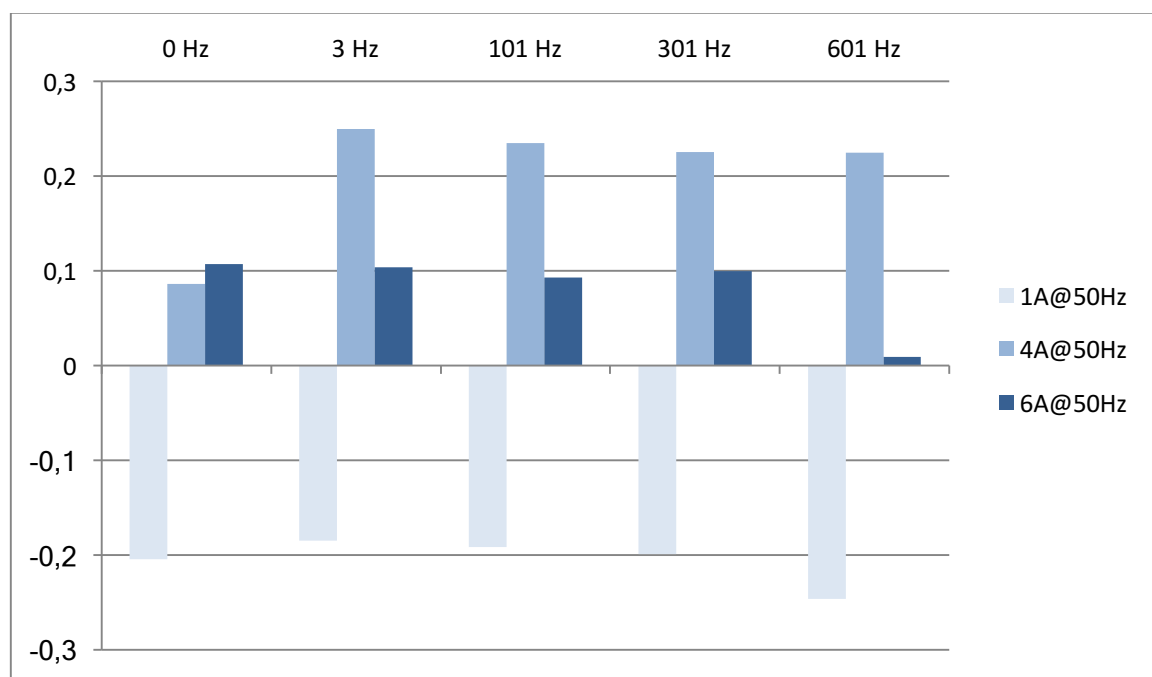
A legpontosabb, és valószínűsíthetően csak véletlen hibával terhelt mérésnek a direkt mérés tekinthető, hiszen ekkor nem volt rendszeres hiba és a galvanikus leválasztást sem kellett figyelembe venni. Ennek függvényében ezt az értéket, értékeket vettük alapul, mint helyes értéket. A galvanikus leválasztás során, a mért áttételek alapján beállított 2100 imp./kWh érték hozzávetőleges beállítása további hibát okozott a mérésben. Ezért megvizsgáltuk külön ezt az esetet is, hogy mekkora így a mérők relatív mérési hibája. A mérések során majdnem minden esetben a relatív hiba abszolút értéke nagyobb volt közvetett táplálás esetén, mint direkt táplálás esetén. A zavaró árammal történő mérés tulajdonképpen már tartalmazza a galvanikus leválasztás miatt keletkezett hibát ezért a végleges relatív hiba meghatározása az alábbi képlet szerint történt:

$$h_{végleges}[\%] = h_{zavar}[\%] - h_{direkt}[\%] - h_{rendszeres}[\%]$$

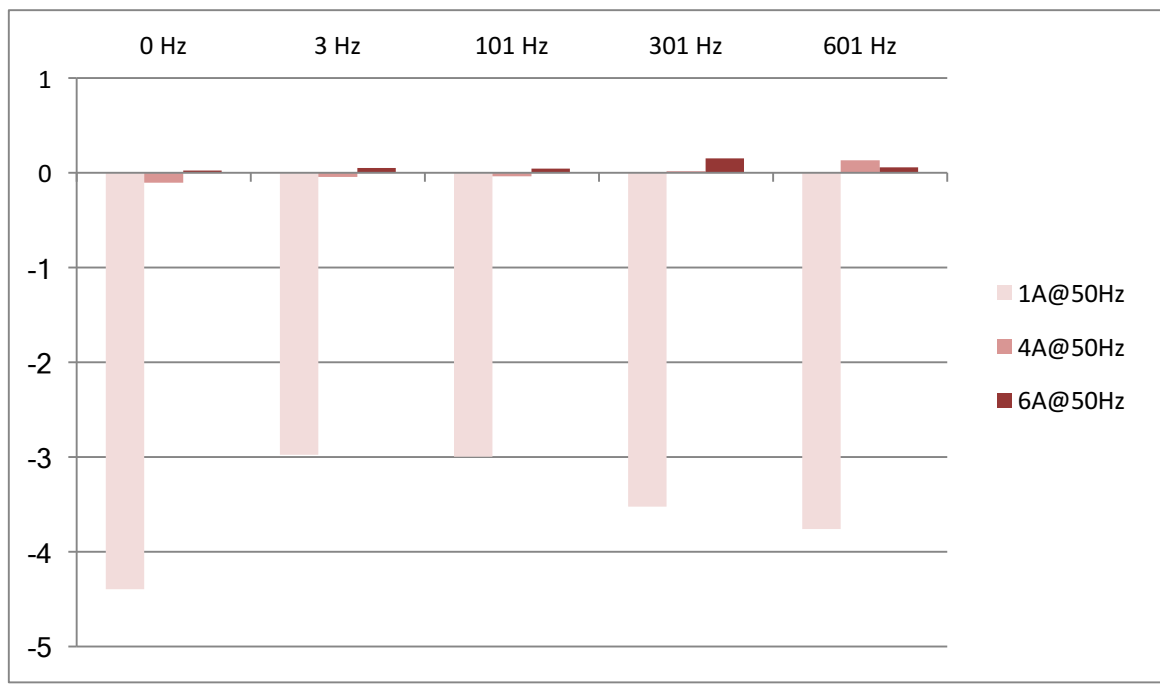
ahol  $h_{zavar}$  a relatív mérési hiba közvetett táplálás esetén mindkét árammal (50 Hz áram + zavaró áram),  $h_{direkt}$  a közvetlen táplálás relatív mérési hibája és  $h_{rendszeres}$  pedig a mérési elrendezésből adódó rendszeres hiba. A végleges hibaszázalék meghatározásánál minden egyes diszkrét áramnagyságon mért eredményt korigáltunk, a neki megfelelő ugyanazon áramnagyságon mért értékekkel. Vagyis az 1 A-en mért relatív hibát ( $h_{zavar}[\%]$ ) az 1 A-en mért direkt mérés relatív hibájával ( $h_{direkt}[\%]$ ), míg a 4 A-en mértét a 4 A-en mért direkt mérés relatív hibájával kompenzáltuk, és így tovább.

### 7.3 Eredmények

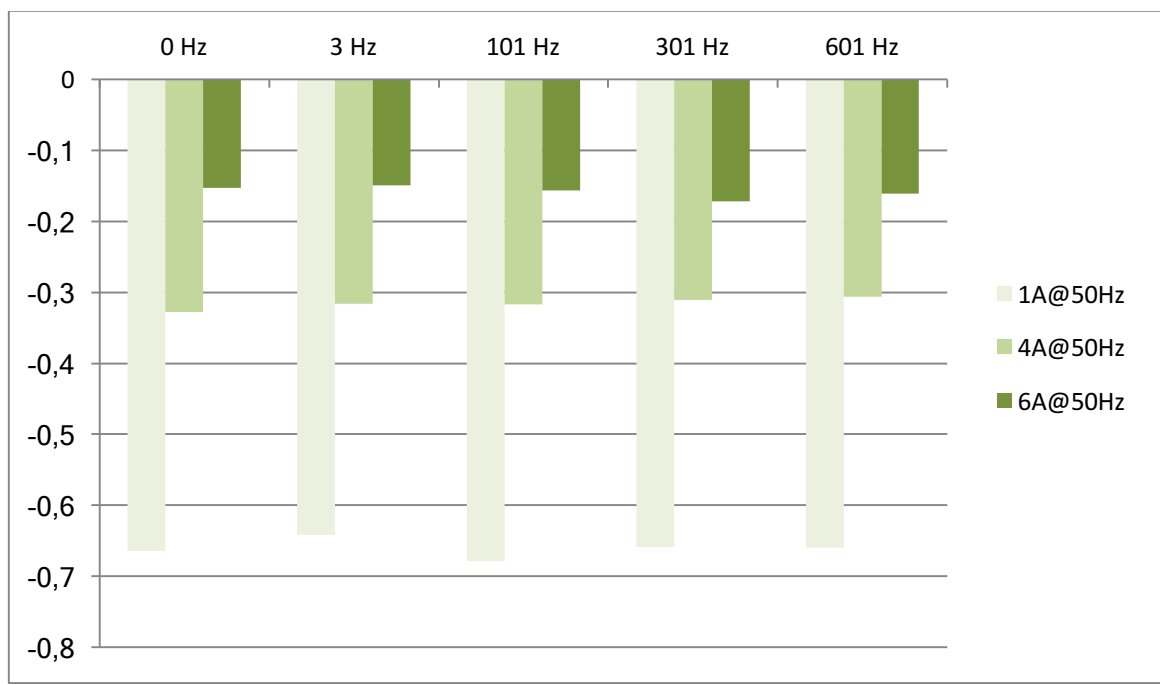
A vizsgálat korigált eredményeit külön adom meg, minden gyártó egy-és háromfázisú mérőjére.



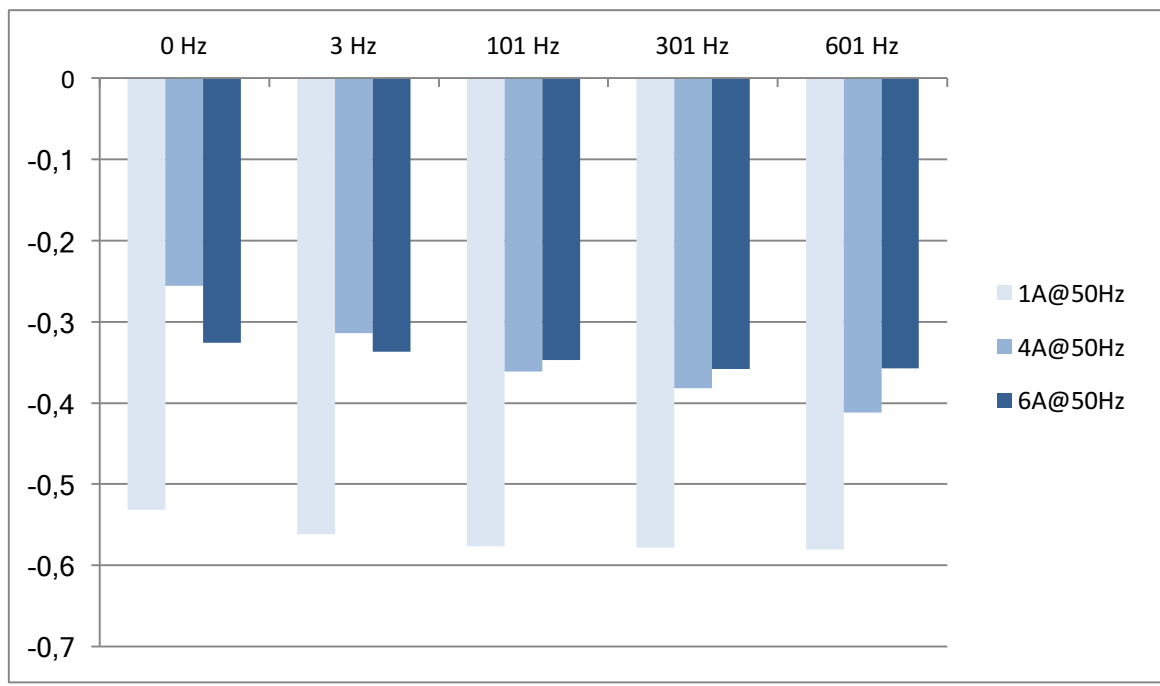
7.3-1. ábra: Az egyes gyártó egyfázisú mérőjének korigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében



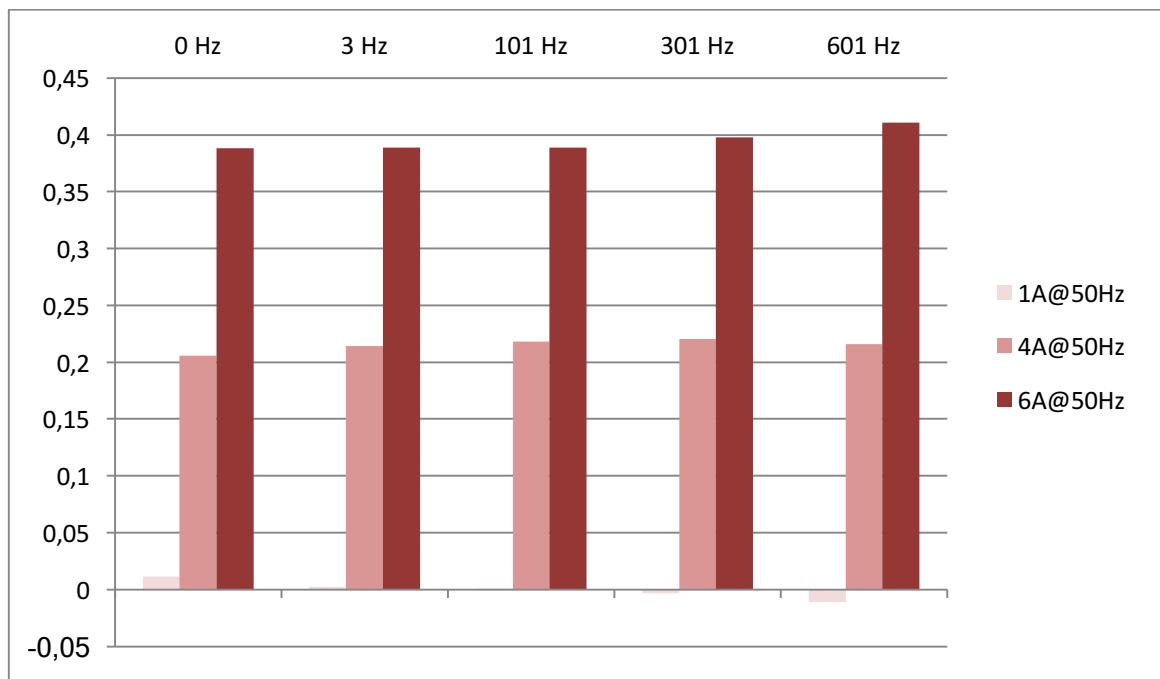
7.3-2. ábra: A kettes gyártó egyfázisú mérőjének korrigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében



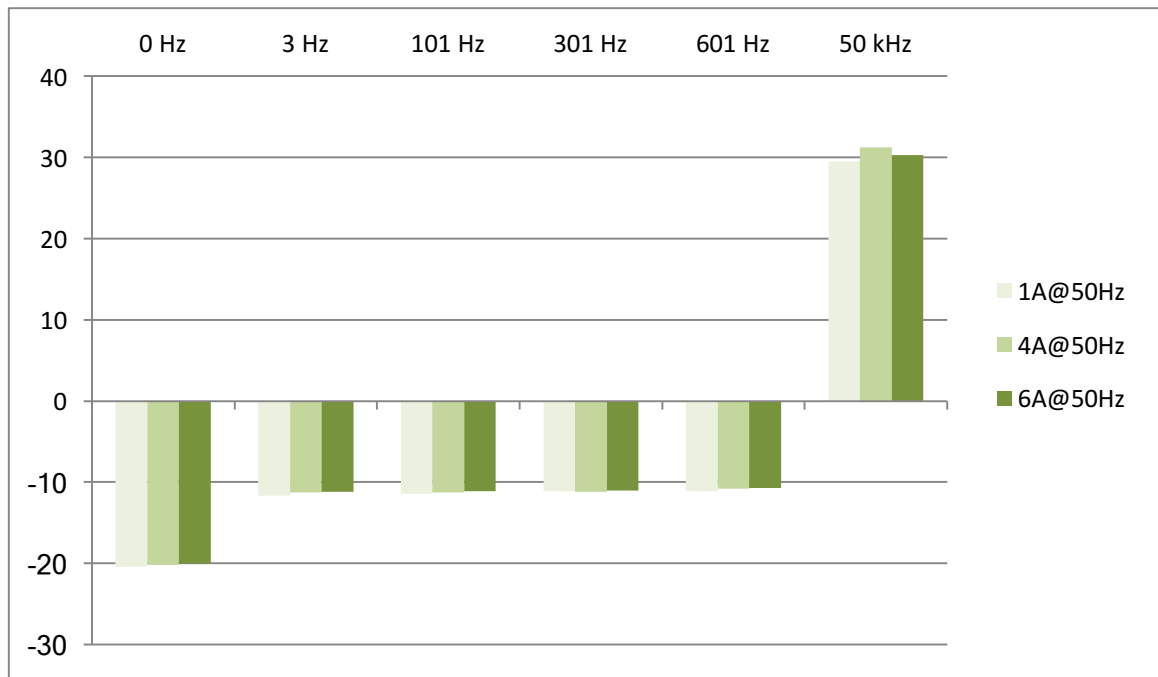
7.3-3. ábra: A hármas gyártó egyfázisú mérőjének korrigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében



7.3-4. ábra: Az egyes gyártó háromfázisú mérőjének korrigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében



7.3-5. ábra: A kettesgyártó háromfázisú mérőjének korrigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében



7.3-6. ábra: A hármas gyártó háromfázisú mérőjének korrigált mérési hibái a különböző vizsgálati jelalakok, és hálózati terhelő áram függvényében

A grafikonokon jól látható, hogy a relatív hibák a legtöbb esetben inkább az alkalmazott hálózati terhelés nagyságának függvényében, mintsem a zavaróáram típusának függvényében változnak. A várakozásainkkal ellentétben a mérők nem voltak érzékenyebbek a hármas környezeti osztálynak megfelelő zavartatás esetén. Egy adott áramú hálózati terhelésnél, a különböző modulált és pásztázó vizsgálatoknál is hasonló relatív hibával mértek a mérők. Ez alól kivételt képez a hármas gyártó háromfázisú elektronikus mérője, mely az egyes környezeti osztály esetén nem, míg hármas környezeti osztályú zavartatás esetén rendkívül érzékenynek bizonyult. A 7.3-6. ábra grafikonján látszik, hogy itt a zavaró jelalaknak is szerepe volt a relatív hibák alakulásában. A pásztázó vizsgálat esetén (0 Hz) körülbelül kétszer akkora relatív hibával mért a mérő, mint az összes többi jelalak esetén. Továbbá érdekes, hogy ezen értékek mind negatívak, (a mérő kevesebb energiát regisztrál, mint amennyi a valóban felhasznált) azonban a folyamatos 50 kHz szinuszos zavartatás esetében a relatív hibákra ellenkező előjelű (a mérő több energiát regisztrál) értékeket adódtak. A vizsgálatok során – hasonlóan az NMI-hez - arra a következtetésre jutottunk, hogy míg a sötét áramérzékelésű villamos fogyasztásmérők nem érzékenyek a hálózati vezetett zavarokra, addig a Rogowski tekercses technológiát alkalmazó mérők között lehet olyan, amelyik jelentős mértékben befolyásolható, és lehet olyan is, amelyik egyáltalán nem. Fontos megemlíteni, hogy a felhasznált villamosenergia számlázásának alapját a hitelesített villamos fogyasztásmérők képezik. A hitelesítés többek között azt is magába foglalja, hogy a mérő a rajta feltüntetett osztálypontosságnak megfelelően mér. Ez MID (Measuring Instruments Directive) szerinti jelöléssel A, B valamint C, amelyek sorrendben megfelelnek a 2-es, 1-es és 0,5-ös

---

osztálypontosságnak. Tulajdonképpen ez nem jelent mást, mint hogy a mérő által regisztrált villamosenergia maximálisan mennyivel térhet el a felhasználó valós fogyasztásától. Kettes osztálypontosság esetén ez 2%-ot jelenthet pozitív vagy negatív irányban. Mint láttuk bizonyos körülmények között a relatív hiba jóval meghaladhatja a gyártói osztálypontosságot. Ahhoz, hogy az okos mérők az okos hálózatok megbízható, és elszámolás releváns mérés technikai elemei legyenek, a kialakult zavarhelyzet minél előbbi kezelése szükséges mind szabványosítási, mind technológiai szempontból.



---

## 8 Irodalomjegyzék

---

- [1] MSZ IEC 1000-1-1:1995: Elektromágneses összeférhetőség (EMC) 1.rész: Általános előírások 1. főfejezet: Az alapfogalmak és meghatározások alkalmazása és értelmezése
- [2] Dán András, Tersztyánszky Tibor, Varjú György: A villamosenergia-minőség, Invest Marketing Bt. Kiadó, Budapest 2006, ISBN 963 22 9619
- [3] CEN, CENELEC, ESMIG, Eurelectric and ORGALIME joint workshop: Electromagnetic Interference in the Cenelec – A band, Presentation of Gerhard Bartak. 2013.09.12: <http://members.esmig.eu/event/joint-workshop-electromagnetic-interference-cenelec-band> (utolsó látogatás időpontja: 2016.10.20)
- [4] S. K. Rönnerberg, M.Wahlberg, E.O.A. Larsson, M.H.J Bollen, C.M. Lundmark: Interaction between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment.
- [5] Gerhard F. Bartak: 77AWG8-140518Bartak15\_Division of frequency band 2 – 150 kHz. (Nem publikált IEC dokumentum)
- [6] Study report on electromagnetic interference between electrical equipment / systems in the frequency range below 150 kHz Edition 2(SC 205 A Mains Communicating systems): <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hSxcGMW3SGJ:standardsproposals.bsigroup.com/Home/getPDF/2326+&cd=2&hl=hu&ct=clnk&gl=hu> (utolsó látogatás időpontja: 2016.10.24.)
- [7] IEC 61000-4-19: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-19: Testing and measurement techniques-Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports.
- [8] IEC CISPR 11:2015: Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.
- [9] IEC CISPR 15:2013: Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment.
- [10] IEC 61000-3-8:1997: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3:Limits-Section 8: Signalling on low-voltage electrical installations-Emission levels, frequency bands and electromagnetic disturbance levels.
- [11] EN 50065-1:2011: Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz-Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances.
- [12] IEC/TS 62578 Ed.2:Power electronics systems and equipment-Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz.
- [13] EN 50065-2-1:2003: Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz-Part 2-1:Immunity requirements for mains communications equipment and systems operating in the range of frequencies 95 kHz to 148,5 kHz and intended for use in residential, commercial and light industrial environments.
- [14] EN 50065-2-1:2003: Signalling On Low-voltage Electrical Installations In The Frequency Range 3 Khz To 148.5 Khz - Part 2-3: Immunity Requirements For Mains Communications Equipment And Systems

---

Operating In The Range Of Frequencies 3 Khz To 95 Khz And Intended For Use By Electricity Suppliers And Distributors

- [15] IEC 61000-4-16: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-16: Testing and measurement techniques- Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz.
- [16] IEC 61000-4-19: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-19: Testing and measurement techniques- Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports.
- [17] CLC/TR 50627:2015 Ed.3.: Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/System in the Frequency Range Below 150 kHz.
- [18] IEC 61000-2-2:2002: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
- [19] Position of TC 13 on SC77A draft document concerning IEC 61000-2-2, related to compatibility levels in the frequency range 2-150 kHz (unpublished IEC document 13/1661/DC)
- [20] Maintenance of publication: IEC 61000-2-2 (unpublished IEC document 77A/915/DC)
- [21] Bernd W. Jaekel: „Current Situation in the Frequency Range from 2 to 150 kHz with regard to electromagnetic compatibility”, Siemens AG, Industry Sector, EMC-Center, Erlangen, Germany, 2012
- [22] Luspay Ödön, Rózsa Lajosné, Varjú György: Erősáramú kábelvonalak, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [23] S. Schöttke, S. Rademacher, J. Meyer, P. Schegner: „Transfer Characteristic of a MV/LV Transformer in the Frequency Range Between 2 kHz and 150 kHz”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015
- [24] M.Trautmann, S. Jeschke, S.Grigo, M.Malek, H.Hirsch: EMI examination of the low-voltage grid in the Frequency Range from 9 kHz to 2 MHz focussing on noise level, impedance, attenuation and the impact on PLC Data Transmission
- [25] Soonwook Hong, Ph.D. and Michael Zuercher-Martinson: Harmonics and Noise in Photovoltaic (PV) Inverter and the Mitigation Strategies.
- [26] Az Európai Parlament és Tanács 2009/72/EK irányelve: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0055:0093:HU:PDF> (utolsó látogatás időpontja: 2016.10.25.)
- [27] Development of Smart Grid and Smart Meters – the Swedish Experience: <http://governmentgazette.eu/?p=5540> (utolsó látogatás időpontja: 2016.10.25.)
- [28] EN-50470-1-2006: Electricity metering equipment (a.c.) Part 1: General requirements, tests and test conditions - Metering equipment (class indexes A,B and C)
- [29] EN-50470-3-2006: Electricity metering equipment (a.c.) Part 3: Particular requirements – Static meters for active energy (class indexes A,B and C)
- [30] Electromagnetic disturbances in the frequency range 2-150 kHz and their effect on static electricity meters in the context of the Measuring Instruments Directive (Position of Cenelec Tc 13, 9th February 2011)

- 
- [31] CLC/TR 50579:2012: Electricity metering equipment (a.c.) – Severity levels, immunity requirements and test methods for conducted disturbances in the frequency range 2 kHz- 150 kHz
- [32] NMI Measuring results: New specific EMC problem: 2-150 kHz presentation (2012.09.26)
- [33] Withdrawal of the Swedish formal objection to standard EN-50470, Electricity metering equipment.